الجزء الثالث

الكهربية والمغناطيسية

إن المشكلة لا تحل في المعمل إنها تحل داخل عقل شخص ما، وكل ما على الأجهزة عمله هو أن تدير رؤوسها حتى ترى الأشياء على النحو الصحيح

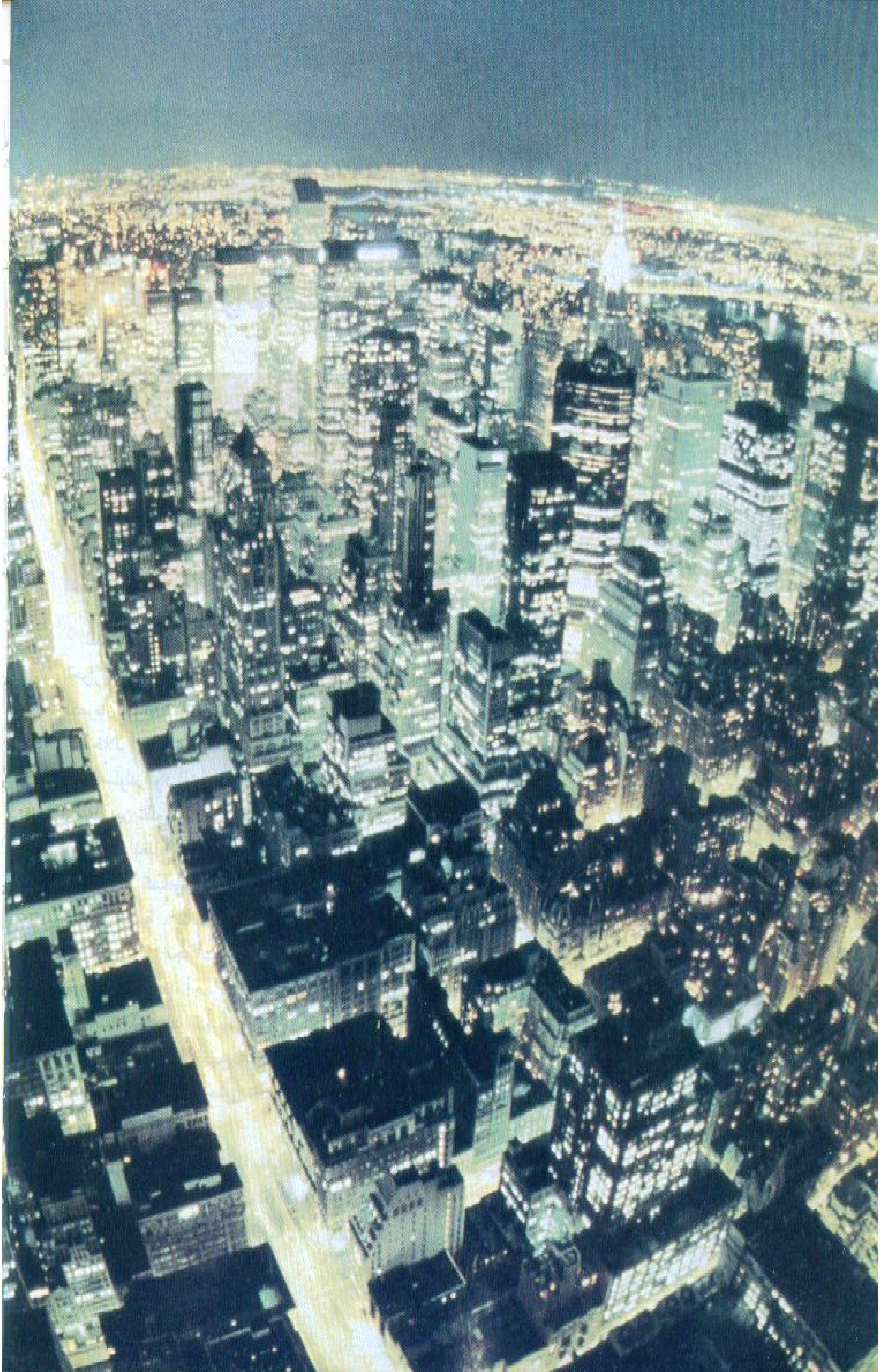
تشارلز كترنج

لقد تطلب وصفنا للظواهر الفيزيائية حتى الآن أربع كميات مستقلة وأساسية فحسب ـ وهى الكتلة ، والطول ، والزمن ودرجة الحرارة . إلا أن رصد قوى أخرى فى الطبيعة ـ مثل المغناطيسية الطبيعية لحجر المغناطيس وجذب فتات المادة بواسطة معدن الكهرمان (واسمه باليونانية إلكترون) الذى سبق دلكه بقطعة من القماش ـ قد تم تسجيلها منذ أزمنة بعيدة .

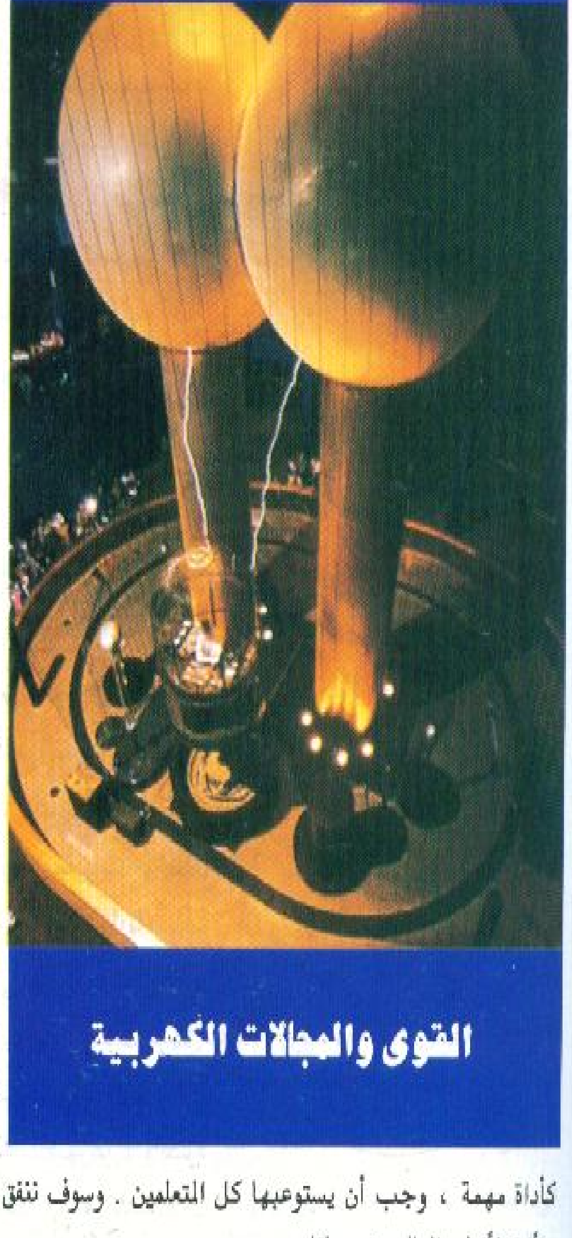
وخلال أواخر القرن الثامن عشر وبداية القرن التاسع عشر بدأ باحثون مثل كولوم فى فرنسا وفرانكلين فى الولايات المتحدة دراسة سلوك المواد المشحونة كهربيًا ، مكتشفين أن هناك نوعين متضادين من الشحنات ، ومشتقين قانون القوة التى تحكم التفاعل بين تلك الشحنات . وقد أخذ النجاح يتلو النجاح خلال القرن التاسع عشر حين دأب العلماء على تنمية فهم مجال الكهربية والمغناطيسية . وكان انحراف إبرة البوصلة حين توضع بالقرب من تيار كهربى دليلاً على أن التيار ينشئ مجالاً مغناطيسيًا . كما وجد أن المجالات المغناطيسية المتغيرة تنشئ مجالات كهربية . وقد تم التنبؤ نظريًا بوجود موجات كهرومغناطيسية ، تتألف من مجالات مغناطيسية وكهربية مهتزة وتنتقل بسرعة الضوء ، ثم تلا ذلك عرضها معمليًا .

ومن بين كل إنجازات الفيزياء الكلاسيكية قد لا يوجد ما ينافس ما ذكرناه الآن من حيث آثاره البعيدة ، حيث أصبح فى مقدورنا تصميم وبناء أجهزة حولت حياتنا اليومية بشكل حقيقى ، وقد يشمل تصنيف تلك الأجهزة والأدوات الضوء الكهربى والمولدات والمحركات الكهربائية وكل وسائل الاتصالات الإلكترونية مثل التليفون والراديو والتليفزيون . كما أن أجهزة أخرى تعتمد فى بنائها على الكهربية والمغناطيسية قد جعلت من المكن قياس ظواهر أدق وأسرع بحيث اتسعت آفاق وحدود البحوث الأساسية . بل أمكن تحقيق تقدم هائل فى التشخيص والعلاج الطبيين ، وكذلك فى استنباط وسائل جديدة لإنتاج المواد وتصنيع السلع المختلفة .

إن الفوائد التى عادت علينا بفضل البحوث فى الكهربية والمغناطيسية لم تكن فى مخيلة أولئك العاملين فى تلك البحوث ، بل ولم تكن هذه الفوائد هى الدافع الأول لديهم لإنجاز أبحاثهم . ولعلنا نحسن صنعًا حين ننظر فى هذه الأمثلة عندما يتساءل صانعو القرارات بناء على نتائج قريبة ـ عن أهمية الاستمرار فى البحث سعيًا وراء المعرفة الأساسية .



الفصل السادس عشر



القوى والمجالات الكهربية

لاشك أنه من العسير علينا تصور العالم منذ قرن من الزمن عندما كان استخدام الكهرباء لا يزال فى مهده . ولم يكن الضوء الكهربائى متاحًا إلا لعدد قليل من الناس أما الآلات والأجهزة الكهربائية التى اعتدنا الآن عليها فلم تكن موجودة بالمرة . وكانت المحركات البدائية والبطاريات مجرد فضول فى بداياته لبيان الأهمية العملية لها . وتبدو المفارقة هائلة اليوم حيث تدخل الكهرباء بشكل أو بآخر فى عمل كل ما نستخدمه من آلات . وبسبب هذا الانتشار الواسع للكهرباء كأداة مهمة ، وجب أن يستوعبها كل المتعلمين . وسوف ننفق عددًا من الفصول القادمة فى تعلم الطرق التى تلعب بها الكهرباء دورًا مؤثرًا فى العالم من حولنا .

16-1 مفهوم الشحنة الكهربية

من الحقائق التاريخية أنه فى القرن السادس قبل الميلاد ، عرف طاليس اليونانى أن الشرارة يمكن أن تحدث وأن الأشياء الخفيفة تنجذب إلى الكهرمان الذى سبق دلكه بالفراء . وكلمة الكهرمان باليونانية هى « إلكترون » ومنها اشتق اسم الكهربية . وخلال القرن الثامن عشر أجرى قدر هائل من التجارب « لكهربة » الأشياء ، بما فى ذلك كهربة البشر وما صاحب ذلك من نتائج فكاهية .

ومن أكبر العلماء أثرًا وإنتاجًا الأمريكى بنيامين فرانكلين ، الذى تعتبر تجربته لإيضاح التكافؤ بين الكهرباء والبرق بواسطة طائرة ورقية تحلق داخل سحابة رعدية ـ تجربة

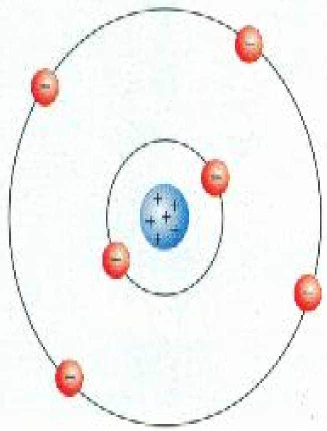
أسطورية . كما كان فرانكلين أول من اقترح مصطلح « الموجب » « والسالب » على نوعى التكهرب اللذين يمكن للجسم أن يصاب بهما .

وقد شهد القرنان التاليان تطور نظرية شاملة للظواهر الكهربية والمغناطيسية . . وقرب نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين تم إنجاز الاكتشافات الأساسية للتركيب الكهربائى للذرة . وفى عام 1871 قاس العالم الإنجليزى ج . ج . طومسون خواص الشحنة السالبة الأساسية وهى الإلكترون ، كما نجح العالم أرنست رذرفورد وهو إنجليزى أيضًا فى عام 1911 فى تحديد هوية النواة الموجبة المتناهية فى الصغر والتى يدور حولها الإلكترون ليكونا معًا الذرة . وأخيرًا ، وفى إطار سلسلة من التجارب التى أجريت فيما بين 1909 و 1917 تمكن العالم الأمريكى وليام ميليكان ومساعدوه من قياس كمية شحنة الإلكترون بدقة .

دعنا الآن نبدأ فى مناقشة طبيعة الشحنة الكهربية حتى ننتقل بعدها إلى استكشاف التنوع الهائل فى الظواهر الكهربية .

16-2 الذرات كمصدر للشحنة

لقد أوضحت الاكتشافات التى ذكرت فى القسم السابق أن الذرة تتكون من نواة ضئيلة موجبة الشحنة يدور حولها جسيمات سالبة الشحنة يطلق عليها إلكترونات . ويتضح هذا بالنسبة لذرة الكربون فى الشكل 1-16 . ولعلك تذكر من مقررات الكيمياء أن الذرات متعادلة كهربيًا ؛ بمعنى أن كمية الشحنة الموجبة بالنواة مساوية تمامًا للشحنة السالبة الكلية التى تحملها الإلكترونات حول النواة . وفى حالة ذرة الكربون ، إذا كانت $-e$ هى شحنة الإلكترون الواحد فإن شحنة النواة هى $+6e$ بالضبط . وسوف نؤجل المناقشة التفصيلية للذرة إلى فصل قادم وسنكتفى هنا باستخدام التركيب الكهربائى لها .

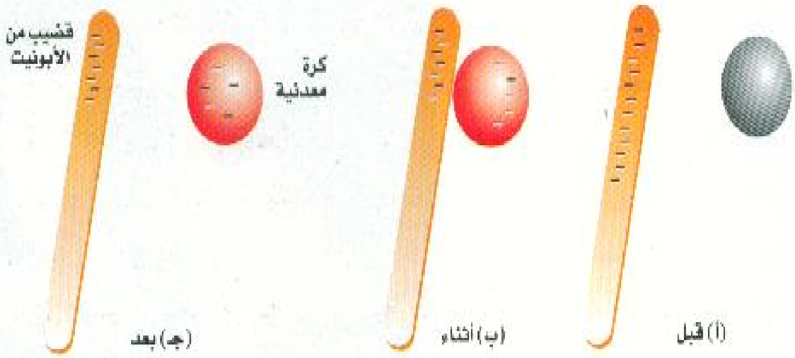


شكل 1-16:
تمثيل تخطيطى لذرة كربون . تتوازن الشحنات السالبة على إلكترونات الذرة الست تمامًا بالشحنة الموجبة للنواة . (النواة والإلكترونات أصغر بكثير جدًا عما هو مبين بالشكل) .

وعلى ما يبدو فالكون كله تقريبًا - إن لم يكن تمامًا - متعادل كهربيًا ، والكرة الأرضية نفسها ليس عليها سوى القدر اليسير - إن وجد أصلاً - من فائض الشحنات الموجبة أو السالبة ؛ ولذا يمكننا فى جميع الأغراض العملية ، اعتبار أن الأرض ليس عليها شحنات فائضة . أما الغالبية العظمى من الشحنات على الأرض وبداخلها فمحتواة داخل الذرات . وإذا وجدت شحنات حرة سواء كانت موجبة أم سالبة فإنها عادة ما تعتبر منتزعة من ذرات ما .

وليس من الصعب على الإطلاق انتزاع إلكترون من الذرة - تحت ظروف معينة - وعلى سبيل المثال ، فلو أن قضيبًا من الإبونيت (وهو نوع من المطاط الصلب) قد دلك فى قطعة من الفراء الحيوانى فإن بعض إلكترونات ذرات الفراء تلتصق بقضيب الإبونيت عن طريق الاحتكاك . (وليس من السهل شرح السبب وراء انتقال الشحنة هذا . . وإن كان هذا الموضوع يرد فى المقررات التى تتناول فيزياء الجوامد) . وهكذا فإن القضيب يكتسب **فائضًا خالصًا من الإلكترونات** التى تجعله مشحونًا بشحنة

سالبة . وعندما يلامس جسمًا معدنيًا فإن بعضًا من فائض الإلكترونـات ينتقل إلى المعدن كما يوضح الشكل 2-16 .



شكل 2-16:
عندما يلامس قضيب الإبونيت المشحون بشحنة سالبة الكرة المعدنية غير المشحونة فإن الإلكترونات تنفصل عن القضيب لتنتشر فوق الكرة .

وبالمثل فلو أن قضيبًا زجاجيًا دلك فى قطعة من الحرير فإن بعضًا من الإلكترونات يغادر ذرات القضيب ، مخلفة **فائضًا من الشحنات الموجبة عليه** . وإذا لامس القضيب موجب الشحنة كرة معدنية متعادلة ، فإن الإلكترونات تغادر بعض ذرات المعدن لتحل محل تلك الإلكترونات التي فقدتها ذرات الزجاج ونتيجة لهذا تكتسب الكرة المعدنية شحنة موجبة خالصة .

ويؤدى احتكاك كثير من المواد بعضها بالبعض الآخر إلى فصل الشحنات . والمواد التى وصفناها الآن تم استخدامها قديمًا لتعريف الشحنة السالبة والشحنة الموجبة قبل أن يعرف الناس بوجود الإلكترون .

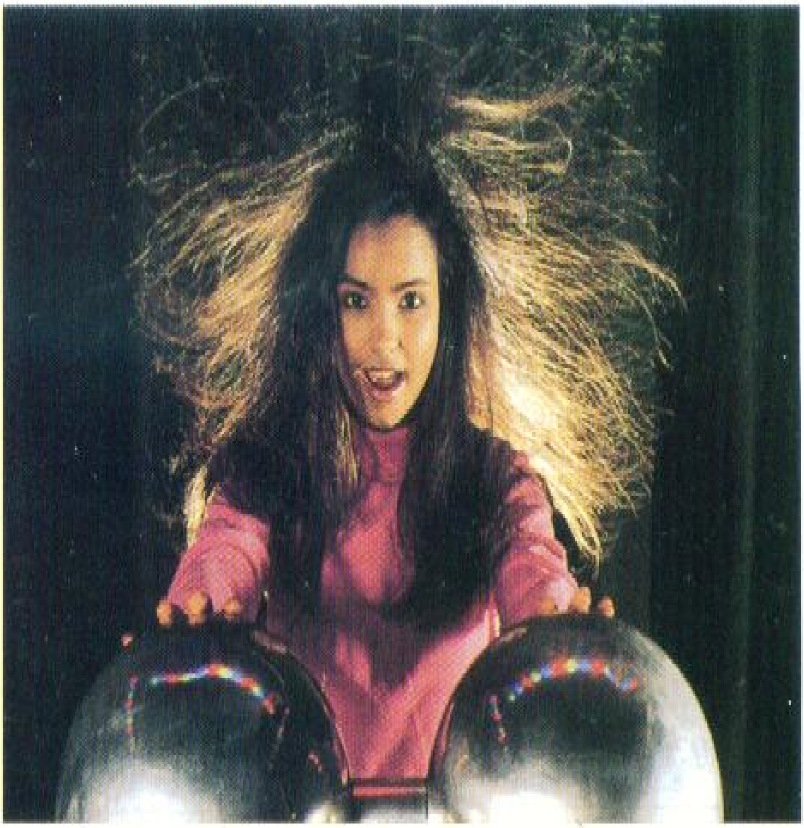
16-3 القوى الكائنة بين الشحنات

الآن وقد عرفنا كيفية الحصول على أجسام مشحونة بشحنات موجبة وسالبة ، فإننا فى وضع يسمح بفحص القوى الكائنة بين كرات خفيفة للغاية ومغطاة بطبقة معدنية . ويمكن شحن تلك الكرات بجعلها تلامس قضيبًا مشحونًا من الزجاج أو الإبونيت . وإذا علقت الكرات من خيوط خفيفة لأمكن إجراء أربع تجارب شيقة ، يوضحها الشكل 3-16 ويمكننا أن نستنتج منها ما يلى :

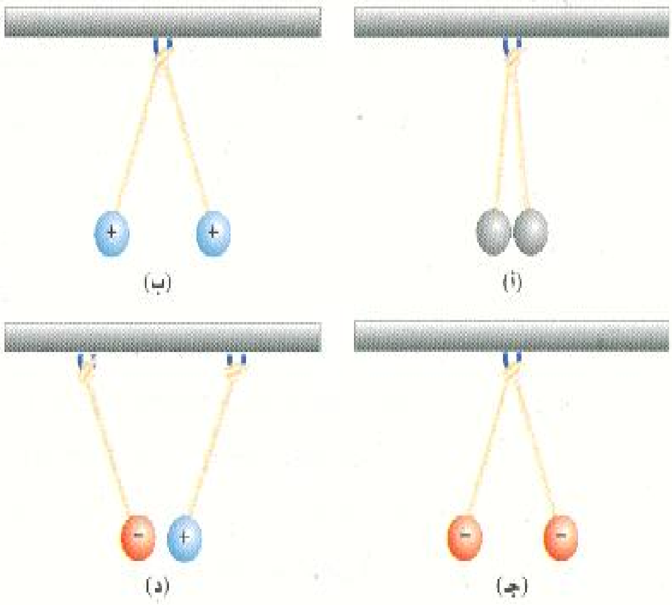
1 تتنافر الشحنات المتشابهة مع بعضها البعض ، بمعنى أن شحنتين موجبتين تتنافران من بعضهما البعض وكذلك تفعل شحنتان سالبتان .

2 تتجاذب الشحنات المختلفة نحو بعضها البعض ، بمعنى أن الشحنات الموجبة تجذب الشحنات السالبة والعكس بالعكس .

3 دائمًا ما يزيد مقدار القوة الكهربية الكائنة بين جسمين مشحونين عن قوة الجاذبية بينهما . (وعلى سبيل المثال فقوة الجاذبية بين الكرتين فى الشكل ب ، جـ ، د أقل بكثير جدًا بحيث لا تؤثر فى الطريقة التى تتعلق بها) .



تتلقى خصلات شعر هذه الطالبة شحنات كهربية لها نفس الإشارة من مولد للكهربية الساكنة . وتتنافر هذه الشحنات مع بعضها البعض مما يجعل شعر الطالبة يتطاير بشكل غريب .



شكل 3–16:
الكرتان فى (أ) غير مشحونتين . أما الكرات المشحونة فى كل من (ب) ، (جـ) ، (د) فتوضح أن الشحنات المتشابهة تتنافر مع بعضها البعض بينما تتجاذب الشحنات المختلفة إلى بعضها البعض .

16–4 العوازل والموصلات

على الرغم من كون المواد كلها مكونة من ذرات . . والذرات كلها مكونة من إلكترونات ونوى إلا أننا نعلم جميعًا التفاوت الكبير فى الخواص الكهربية للمواد . وهناك مجموعتان رئيسيتان تنقسم إليهما المواد تبعًا لخواصها الكهربية وهما : **الموصلات وغير الموصلات** (أو العوازل)* .

* هناك قسم ثالث للمواد يطلق عليه **أشباه الموصلات** وقد يعمل كعازل أو كموصل حسب درجة حرارته وظروف الطاقة الأخرى المؤثرة عليه .

ففى العوازل ، تكون إلكترونات أية ذرة مربوطة بشدة إلى تلك الذرة وغير حرة على الحركة خلال المادة ؛ ولهذا ، فحتى لو أن قضيبًا مشحونًا اقترب من عازل ما ، فإن إلكترونات ونوى ذرات ذلك العازل لن تكون قادرة على الحركة تحت تأثير التجاذب أو التنافر مع شحنة القضيب .

أما الموصلات الكهربية فلها مسلك مختلف تمامًا ؛ إذ تحتوى على شحنات حرة الحركة خلال المادة . والفلزات موصلات مألوفة ؛ وعلى الرغم من أن كل ذرة فى الفلز متعادلة بطبعها (أى غير مشحونة إلا أن الإلكترونات البعيدة عن النواة معرضة للتحرر بسهولة عن الذرة . ثم هى بعد ذلك قادرة على الحركة خلال الفلز حاملة شحناتها السالبة من موقع إلى آخر فى عملية الانتقال . ولهذا ، فحين يقترب قضيب سالب الشحنة من قطعة فلزية (دون أن يلمسها) ، فإن القضيب يتنافر مع بعض الإلكترونات الحرة داخل الفلز فتندفع إلى أقصى بقعة من الفلز . وبنفس الطريقة يجذب قضيب موجب الشحنة الإلكترونات الحرة إلى أدنى بقعة فى الفلز من القضيب .

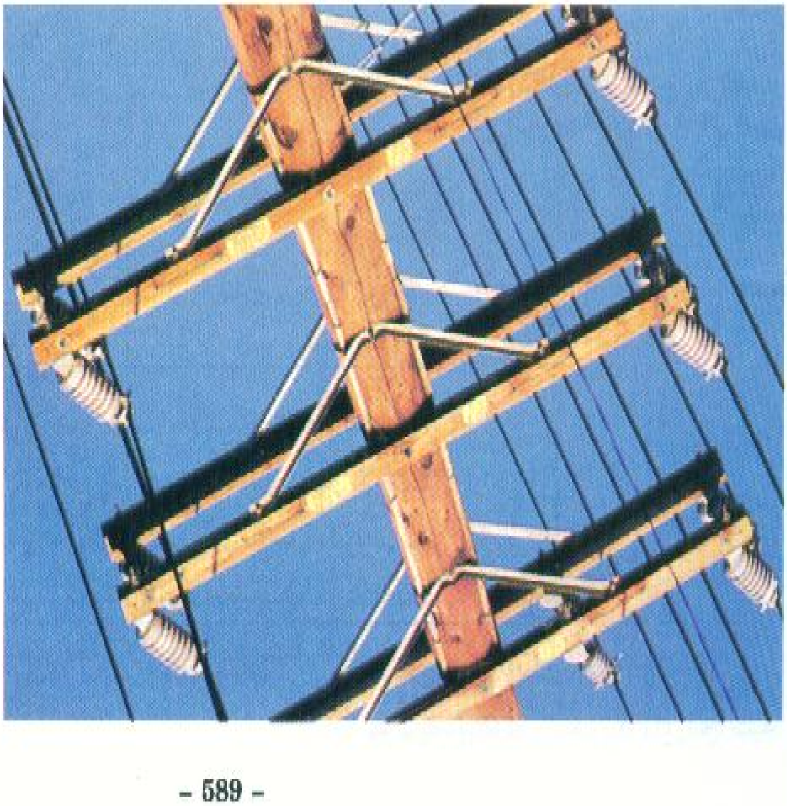
وليست الفلزات هى الموصلات الكهربائية الوحيدة ، فكثير من المواد ـ مثل المحاليل الأيونية ـ تحتوى على أيونات (ذرات مشحونة) قادرة على الحركة بحرية نسبية خلال المادة . وكل الموصلات الكهربائية تحتوى على شحنات قادرة على الحركة لمسافات كبيرة عندما تتنافر أو تتجاذب مع أجسام مشحونة قريبة .



شكل 4-16:
أحد نماذج إلكتروسكوب ذى وريقة ذهبية ، ويتم عزل الجزء المكون من الكرة الفلزية (المعدنية) والقضيب والوريقة الذهبية عن جسم الإلكتروسكوب .

16-5 الإلكتروسكوب (المكشاف الكهربى)

الإلكتروسكوب (الشكل 4-16) هو أداة بسيطة تستخدم للكشف عن وقياس شحنات ضئيلة المقدار . وهو مكون من قضيب (ساق) فلزى معلق به وريقتان رقيقتان

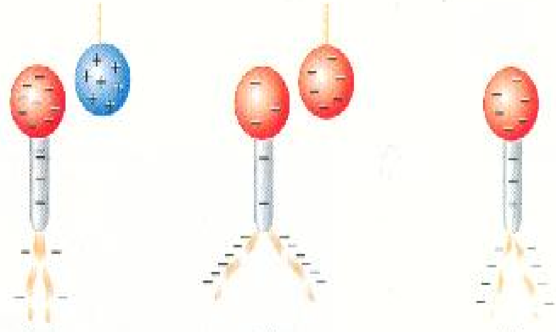


يستدعى نقل الكهرباء استخدام موصلات لحملها وعوازل لحماية الأعمدة التى ترفع عليها أسلاك التوصيل (الكابلات) .

للغاية ومصنوعتان من رقائق الذهب ، داخل علبة معدنية وذلك من خلال عازل يحفظ القضيب من ملامسة العلبة . ويغطى وجها العلبة بالزجاج حتى يمكن رؤية وضع الوريقات الذهبية .

سنفترض الآن أن شحنة سالبة قد نقلت إلى الإلكتروسكوب وذلك عند ملامسة قطعة إبونيت مشحونة للكرة المعدنية ..... وستكون هذه الشحنة محصورة فى نطاق الكرة والقضيب والوريقات الذهبية نظرًا لكونها جميعا معزولة . ولما كانت الشحنات المتشابهة تتنافر مع بعضها البعض ، فإن الشحنات السالبة التى على القضيب ـ فى الأصل ـ توزع نفسها بشكل منتظم على الكرة والقضيب والوريقات الذهبية . وينشأ عن هذا أن الوريقتين ـ لكونهما حرتى الحركة ولتنافرهما مع بعضهما البعض بالشحنات المتشابهة عليهما ـ تتخذان الوضع الموضح فى الشكل 5-16 (أ) .

وإذا ما قربت كرة سالبة الشحنة من الكرة المعدنية للإلكتروسكوب ، كما فى الشكل 5-16 (ب) فإن كثيرًا من الشحنات السالبة داخل الكرة المعدنية تتدافع إلى أسفل القضيب مسببة مزيدًا من الانفراج بين الوريقتين . ويحدث العكس تمامًا إذا قربت كرة موجبة الشحنة من الإلكتروسكوب (الشكل 5-16 (جـ)) وعلاوة على ذلك فالكرة التى لا شحنة عليها لن تثير أى اضطراب ملحوظ فى الإلكتروسكوب . ويمكننا باستخدام هذا الجهاز تحديد إشارة الشحنة الكهربية وكذا مقدارها بالتقريب . وعليك الآن أن تقنع نفسك أن إجراء مشابهًا يمكن تتبعه لو أن الإلكتروسكوب قد شحن فى البداية بشحنة موجبة .



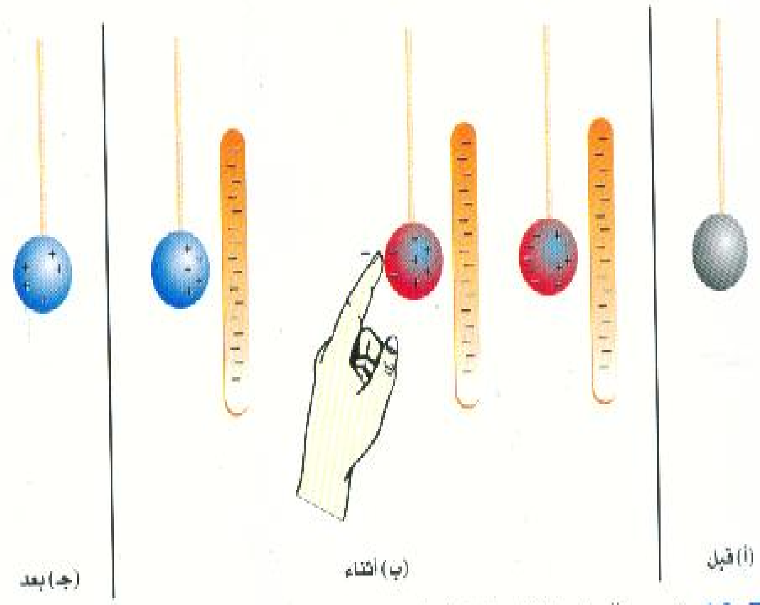
شكل 5-16:
يستخدم الإلكتروسكوب المشحون فى تحديد الإشارة والمقدار التقريبى للشحنة التى على جسم ما .

16-6 الشحن بالتوصيل وبالحث

هناك طريقتان عامتان لوضع شحنات كهربية على جسم معدنى باستخدام جسم ثان مشحون سلفًا . ولنعتبر مثلا الطرق التى تستطيع بها استخدام قضيب من الإبونيت سالب الشحنة فى شحن كرة معدنية . . واحدى الطرق هى بأن نجعل الكرة تلامس القضيب كما ذكر فى القسم السابق . وعندما يحدث الاتصال تتحرك بعض الشحنات السالبة الفائضة من القضيب نحو الكرة . وهذه العملية التى يوضحها الشكل 2-16 تسمى **الشحن بالتوصيل** .

كما يمكن استخدام نفس القضيب بطريقة أخرى لشحن الكرة . وهذا ما يوضحه الشكل 6-16 . وخلال هذه العملية التى يطلق عليها الشحن بالحث (أو بالتأثير) لا يتم تلامس بين القضيب والكرة على الإطلاق . إذ عندما يقرب القضيب من الجانب الأيسر للكرة فإن بعض إلكترونات المعدن تندفع نحو الجانب الأيمن للكرة مخلفة شحنة موجبة على الجانب الأيسر . وحيث أنه لم تحدث إضافة أو إزالة أية شحنات من على الكرة فإنها تظل - بطبيعة الحال - متعادلة كهربيًا . افترض الآن أنك قمت بلمس الكرة بجسم ما غير قضيب الإبونيت المشحون ، كأصبعك مثلاً . ولما كان جسمك يعتبر موصلاً للكهرباء (بالرغم من أنه ليس موصلاً جيدًا) فإن الشحنات تتحرك من على الكرة عبر جسدك متجهة إلى الأرض . وهكذا فالقضيب سالب الشحنة الموجود بالقرب من الكرة يستحث شحنات سالبة كى تغادر الكرة وتنتقل إلى الأرض . (ويقال حينئذ أن الكرة **موصلة بالأرض (مؤرّضة)** ، ويستخدم الرمز ⏚ لإيضاح ذلك . ولتوصيل جسم ما بالأرض لابد من توصيله بواسطة سلك معدنى بإحدى أنابيب المياه أو بجسم آخر جيد التوصيل مغروس فى الأرض) . وبمجرد أن تنتقل الشحنات السالبة من الكرة إلى الأرض ، فإن الكرة لن تصبح متعادلة . وإذا ما فصل الخط الموصل بالأرض ، وأبعد القضيب سالب الشحنة ، فإن الكرة ستصبح موجبة الشحنة . (لماذا يتم إبعاد جسم التوصيل بالأرض قبل إبعاد القضيب المشحون ؟) .

لو أنك قارنت بين الشكلين 2-16 و 6-16 لأمكنك ملاحظة أن قضيب الإبونيت يمكنه شحن جسم معدنى بشحنة **سالبة** عن طريق **الحث** (أو التأثير) . وقد يكون من الشيق لك أن تقوم برسم أشكال مماثلة باستخدام قضيب زجاجى موجب الشحنة . وفى هذه الحالة تكون الشحنات معكوسة الإشارة .



شكل 6-16:
شحن كرة معدنية بالحث لاحظ أن القضيب والكرة لا يتلامسان مطلقًا ، ولكن الإصبع والكرة يتلامسان ونتيجة لهذه العملية ينتهى الأمر بالقضيب والكرة وعلى كل منهما شحنة مختلفة .

7-16 تجربة دلو الثلج لفاراداى

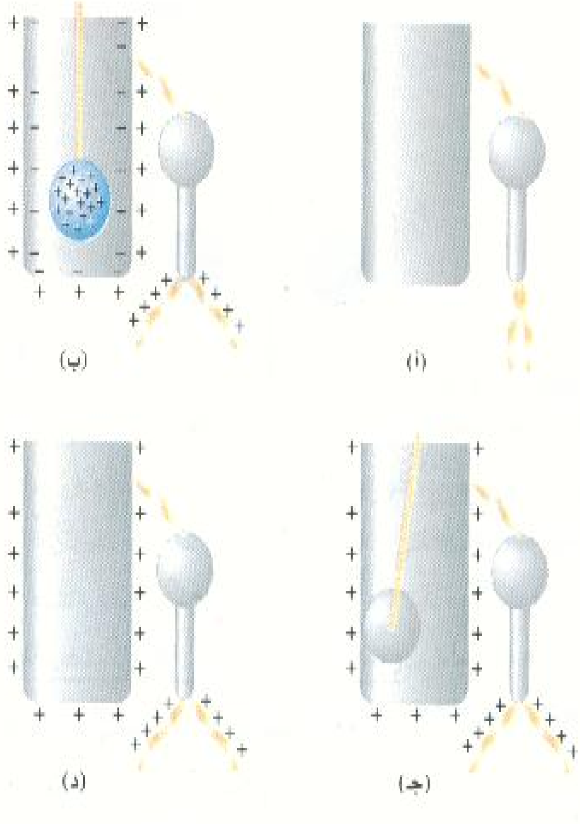
فى عام 1843 قام مايكل فاراداى بإجراء تجربة بسيطة وإن كانت مفيدة للغاية ، حيث أوصل دلو ثلج معدنى بالإلكتروسكوب غير مشحون كما يوضح الشكل 7-16 (أ) .

وعندما أدلى كرة معدنية موجبة الشحنة ومعلقة بخيط داخل ذلك الدلو (دون أن تلامسه) ، كما في الشكل (ب) فإن ورقتي الإلكتروسكوب انفرجتا مما يدل على أن بعض الشحنات قد انتقلت بالحث على السطح الخارجي للدلو .

وعلاوة على ذلك ، فعندما تحركت الشحنات في نطاق الدلو فإن إنفراج ورقتي الإلكتروسكوب لم يتغير . ولم ترجع الوريقتان إلى وضعهما المتلاصق إلا عندما انتزعت الكرة من داخل الدلو مما يدل على أن الدلو قد عاد إلى حالة التعادل الكهربي .

وقد لاحظ فاراداي أيضًا ، أنه عند تلامس الكرة المعدنية المشحونة بالجدار الداخلي للدلو ، كما في الشكل (جـ) ، فإن ورقتي الإلكتروسكوب ظلتا في وضع الانفراج والتباعد . على أنه في هذه الحالة - لو نزعت الكرة من داخل الدلو فإن ورقتي الإلكتروسكوب بقيتا منفرجتين كما في الشكل (د) ، مما يدل على أن الدلو ظل مشحونًا وعندما قربت الكرة من إلكتروسكوب آخر ، فإنها لم تحدث أي تأثير على الوريقات الذهبية . وعلى ما يبدو فإن ملامسة الكرة للجدار الداخلي للدلو قد عادلت تمامًا الشحنة الأصلية الفائضة على سطح الكرة . وحيث أن ورقتي الإلكتروسكوب المتصل بالجدار الخارجي للدلو لم تتحركا عندما لامست الكرة الجدار الداخلي له فإن فاراداي استنتج أن السطح الداخلي للدلو قد كان عليه ما يكفي من الشحنة ليعادل الكرة **تمامًا** ، وأن الدلو قد تُرك الآن وعلى سطحه الخارجي شحنة صافية مساوية للشحنة التي كانت في الأصل على الكرة .

ويمكننا بناء على هذه التجارب أن نخرج بالنتائج التالية :



شكل 7-16:
تجربة دلو الثلج لفاراداي .

1 إذا علق جسم معدنى مشحون داخل وعاء معدنى متعادل فإنه يستحث شحنة مساوية في المقدار ومخالفة فى الإشارة على الجدار الداخلي للوعاء .

2 عندما يلامس الجسم المعدنى المشحون الجدار الداخلى للوعاء فإن الشحنة الناشئة بالحث تعادل تمامًا الشحنة الفائضة على الجسم .

3 عندما يوضع جسم مشحون داخل وعاء معدنى متعادل ، فإن شحنة مساوية ولها نفس الإشارة تدفع إلى السطح الخارجى للوعاء .

4 تستقر كل الشحنة الصافية على أى جسم معدنى على سطحه الخارجى عندما يتوافر مسار موصل يمكن للشحنة أن تمر فيه .

هذه حقائق مهمة تتعلق بالشحنات الكهربية الموجودة على الموصلات وسوف نقوم بتفسيرها بشكل أشمل عند فحص قانون كولوم ومفهوم المجالات الكهربية فى الأقسام 16-9 حتى 16-13 .

16-8 بقاء الشحنة

تعلمنا فى الميكانيكا أن الطبيعة تحافظ (تبقى على) كميات معينة . ومن بين تلك الكميات ، الطاقة ، كمية الحركة الخطية وكمية الحركة الزاوية . وتخضع كل من هذه الكميات لقانون بقاء ، وكما رأينا من قبل فإن هذه الحقيقة ذات أهمية عظيمة فى الكون الذى نعيش فيه .

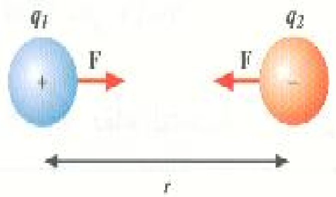
هناك أيضًا قوانين للبقاء تنطبق على الكميات الكهربية . وأحد هذه القوانين هو قانون بقاء الشحنة الكهربية ؛ ومضمونه أن المجموع الجبرى لكل الشحنات فى الكون يبقى ثابتًا على الدوام . وقد أصبحت هذه الحقيقة واضحة لنا فى هذا القرن فقط . فعندما تمكن العلماء من توليد جسيمات جديدة عند قذف جسيم ذى طاقة عالية بجسيم آخر داخل معجلات عملاقة ، فإنهم اكتشفوا أن الشحنات دائمًا ما تولد (أو تتلاشى) على هيئة أزواج . وأى تفاعل من شأنه إيجاد إلكترون (شحنته $-e$) يوجد أيضًا جسيمًا شحنته $+e$. وبالمثل عندما يتحد جسيم شحنته $+e$ كالبوزيترون (الإلكترون الموجب) مع جسيم شحنته $-e$ ، فإن الشحنتين كلتيهما تختفيان ، ويكون المجموع الجبرى فى البداية صفرًا ، ويظل صفرًا بعد أن يكتمل التفاعل . وفى كل تجربة ، يكون المجموع الجبرى للشحنات قبل التفاعل هو نفس المجموع بعد ذلك . ويبدو أنه لا توجد وسيلة يمكن بها خلق أو تدمير شحنة صافية . . ونستنتج من هذا أن الشحنة فى الكون لا تتغير . وهذا هو ما يسمى **قانون بقاء الشحنة** . وإحدى وسائل التعبير عن هذا القانون على نطاق أصغر نوعًا ما هى :

لا يمكن خلق أو تدمير شحنة موجبة أو سالبة صافية فى أى عملية فيزيائية .

لاحظ أن القانون لم ينص على أن عدد الإلكترونات أو البروتونات فى الكون ثابت على الدوام ؛ فنحن نعلم عديدًا من التفاعلات يتم فيها إيجاد أو تدمير أزواج من

الجسيمات ذوات الشحنات المتضادة . وعلى الرغم من عدم معرفتنا ـ حتى الآن ـ بالشحنة الصافية الكلية فى الكون ، أو فى مجرتنا ، أو حتى فى الكرة الأرضية والجو المحيط بها (من الممكن أن تكون الشحنة الصافية الكلية قريبة من الصفر) ، إلا أن معرفتنا ببقاء الشحنة ستظل ذات نفع عظيم لنا . وسوف نستعمل هذا المفهوم عند مناقشة الدوائر الكهربائية . وبالإضافة إلى ذلك ، فعندما يحاول علماء فيزياء الجسيمات أن يدركوا كنه الجسيمات التى قد تنشأ فى تفاعلات الطاقات العالية فإن قانون البقاء يرشدهم إلى تقرير أى التفاعلات ممكن وأيها غير ذلك .

16–9 قانون كولوم



شكل 8–16:
تجذب الشحنتان المختلفتان إحداهما الأخرى بقوة متساوية حتى وإن كانت شحنتاهما غير متساويتين فى المقدار .

لقد اكتشف العالم تشارلز أوجستين دى كولوم (1736 – 1806) القانونَ الرياضى الذى يصف كيفية تنافر الشحنات المتشابهة وتجاذب الشحنات المختلفة عام 1785 ، وسمى ذلك القانون **بقانون كولوم** . وبواسطة ميزان حساس للغاية ، شبيه بذلك الذى استخدمه العالم كافندش فى دراساته حول الجاذبية ، استطاع كولوم أن يقيس القوة بين جسمين مشحونين صغيرين (الشكل 8–16) . ولنعتبر كرتين من الصغر بمكان بحيث يمكن اعتبارهما نقطتين بالمقارنة مع المسافة r بين مركزيهما وأنهما تحملان شحنتين $+q_1$ و $-q_2$. وبإجراء عدد من التجارب تمكن كولوم من استنتاج أن القوة المؤثرة على الكرة رقم 1 تتغير فى تناسب طردى مع حاصل ضرب الشحنتين وعكسى مع مربع المسافة بين مركزيهما :

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = \text{constant}\ \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (16\text{–}1)$$

وأن القوة تتخذ الاتجاه المبين فى الشكل 8–16 . ولو أن الشحنتين كانتا إما موجبتين أو سالبتين فإن مقدار القوة سيكون هو نفسه ، أما الاتجاه سيكون عكس ما هو موضح فى الشكل 8–16 وطبقاً لقانون نيوتن للفعل ورد الفعل فإن القوة المؤثرة على الكرة رقم 2 لابد أن تكون مطابقة فى المقدار ومعاكسة فى الاتجاه .

وقبل أن نتمكن من تقدير قيمة ثابت التناسب فى المعادلة 1–16 فلابد أن نستقر على وحدة لقياس كمية الشحنة . وحيث أن الشحنة والقوة الكهربية التى تحدثها من الخواص الفيزيائية الأساسية الجديدة علينا ، لذا فوحدة الشحنة لا يمكن أن تشتق ببساطة من وحدات معروفة ومستقرة ومثلها مثل الكتلة والطول والزمن ودرجة الحرارة فإن الشحنة ذات بعد أساسى لابد من تعريف وحدته . وكما سنرى فى القسم 8–22 فإن وحدة SI (النظام الدولى) للشحنة تعرف بدلالة التيار الكهربى . أما الآن فسننص ببساطة على أن وحدة SI للشحنة هى **الكولوم** (C) . وحين نستعمل هذه الوحدة لكل من q_1 و q_2 فإن قانون كولوم سيكتب على الصورة :

$$F = k\,\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (16\text{–}2)$$

حيث تقاس F بوحدات نيوتن و r بالمتر . ويتعين ثابت التناسب k بالتجربة حيث يساوي $8.9874 \times 10^9\ N.m^2/C^2$. وذلك عند إجراء التجربة في الفراغ (أو على أحسن تقريب في الهواء) . وسوف نعتبر k عادة مساوية $9.0 \times 10^9\ N.m^2/C^2$.

ويكتب الثابت k دائمًا مساويًا $(1/4\pi\epsilon_0)$ حيث يطلق على ϵ_0 **سماحية الفراغ** ، وتتخذ القيمة التالية :

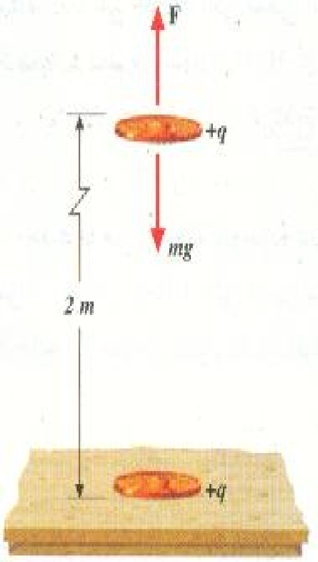
$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N.m^2$$

عندما نقوم بإدخال القيم العددية في المعادلة 2–16 فسنرى أن الكولوم الواحد يعتبر كمية كبيرة جدًا من الشحنة . فلو أن لدينا شحنتين مقدار كل منهما كولوم واحد وتفصلهما مسافة مقدارها متر واحد فإن كلاً منهما تؤثر على الأخرى بقوة مقدارها تسعة بلايين نيوتن ! أما كميات الشحنة الساكنة التي نتعامل معها في حياتنا اليومية فمقاديرها عادة تقاس بالميكروكولوم أو أقل .

والكمية الأساسية للشحنة التي توجد داخل المادة هي كما ذكرنا في القسم 2–16 ، الشحنة التي يحملها الإلكترون والبروتون ويرمز لها بالرمز e . وقيمة e المعينة بالتجربة هي :

$$e = 1.60218 \times 10^{-19}\ C$$

وكما يقتضي الأمر في القسم 2–16 فإن البروتون يحمل شحنة مقدارها $+e$ والإلكترون $-e$. وكل الجسيمات الأساسية المشحونة والتي تم اكتشافها حتى الآن في المواد المعتادة تحمل شحنة مقدارها e أو مضاعفات صحيحة لها . وهكذا يتضح أن الشحنة e هي أصغر كمية ، أو كمة ، للشحنة الموجودة في الطبيعة* .



شكل 9–16:
إن كسرًا ضئيلاً من الإلكترونات هو الذي تلزم إزالته من البنس حتى تظهر القوى الكهربية الهائلة .

وتبرز التجارب سمة أخرى مهمة للقوة الكهربية ، فعندما تؤثر جسيمات مشحونة متعددة بقوة على بعضها البعض ، فإن تلك القوة تضاف إلى بعضها البعض . فعلى سبيل المثال ، لنفترض أن شحنتين كانتا قريبتين من شحنة ثالثة ؛ ستؤثر كل من الشحنتين بقوة حسب قانون كولوم على الشحنة الثالثة ، وتكون القوة الكلية المؤثرة على الشحنة الثالثة هي ببساطة الجمع المتجهي للقوتين المنفصلتين . وتسمى هذه الحقيقة **مبدأ التراكب** لقوى قانون كولوم وسوف تتضح كيفية استعماله في بعض الأمثلة التالية .

* بناء على النظريات الحديثة للجسيمات الأساسية فإن بعض تلك الجسيمات كالبروتون والنيوترون تتكون من اتحاد جسيمات (تسمى **كواركات**) وتحمل شحنات مقدارها $e/3$ أو $2e/3$. ولم يتيسر حتى الآن فصل هذه الجسيمات بالتجربة ؛ وحتى لو أمكن الحصول عليها في المستقبل ، فإن ذلك لن يغير من حقيقة أن بالطبيعة حدًا أدنى للشحنة التي يمكن تواجدها .

مثال 16-1 :

يزن « بنس » نحاسي نحو 3 g ويحتوي على نحو 3×10^{22} ذرة نحـاس . افترض أن بنسين أزيل منهما جزء من إلكتروناتهما بحيث اكتسب كل منهما شحنة موجبة خالصة مقدارها $+q$. وحين وضع أحدهما فوق منضدة فإن الآخر سيظل معلقاً في الـهواء بحيث يتزن وزنه مع القوة الكهربية ، على مسافة 2 m فوق الأول ، كما هو موضح بالشكل 9-16 .

(أ) ما هو مقدار الشحنة q التي من شأنهما المحافظة على هذا الوضع ؟

(ب) وكم عدد الإلكترونات التي لزم أن تزال من كل « بنس » ليكتسب الشحنة $+q$ ؟

(جـ) وما هو كسر ذرات النحاس التي ستفقد إلكتروناً ؟

استدلال منطقي : الجزء (أ)

سؤال : ما هو وزن البنس ؟

الإجابة : الوزن $= mg = (3 \times 10^{-3}\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 0.03\ \text{N}$

سؤال : ما هي العلاقة التي تعطي القوة الكهربية المؤثرة على البنس العلوي ؟

الإجابة : نعلم من المعادلة 2-16 أن :

$$F = \frac{(9\times10^{9}\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)q^2}{(2\ \text{m})^2}$$

حيث q هي الشحنة الموجودة على كل بنس .

سؤال : ما هي المعادلة التي تتعين منها الشحنة q ؟

الإجابة : يجب أن يكون مقدار القوة F مساويًا للوزن وهو 0.03 N ، ولذا

$$\frac{(9\times10^{9}\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)q^2}{(2\ \text{m})^2} = 0.03\ \text{N}$$

استدلال منطقي : الجزء (ب)

سؤال : إذا عرفت q ، فما الذي يحدد عدد الإلكترونات المنتزعة ؟

الإجابة : إن كل الكترون يغادر البنس وعليه شحنة إضافيـة موجبـة $+e$ ولـهذا يكـون عدد الإلكترونات المنتزعة هو $n = q/e$.

استدلال منطقي : الجزء (جـ)

سؤال : ما هي علاقة n بكسر الذرات التي تفقد إلكتروناً ؟

الإجابة : يحتوي البنس على عدد إجمالي من الـذرات هـو $N = 3 \times 10^{22}$ ذرة . والكسر الذي سيفقد إلكترونات هو n/N .

الحل والمناقشة : وجدنا في الجزء (أ) أن

$$q^2 = \frac{(0.03\ \text{N})(2\ \text{m})^2}{9\times10^{9}\ \text{N.m}^2/\text{C}^2}$$

وهذا يعطى :

$$q = 4 \times 10^{-6}\ C = 4\mu C$$

وعدد الإلكترونات التى أزيلت هو :

$$n = \frac{q}{e} = \frac{4 \times 10^{-6}\ C}{1.6 \times 10^{-19}\ C} = 2 \times 10^{13}$$

وهذا يمثل كسرًا مقداره :

$$\frac{n}{N} = \frac{2 \times 10^{13}}{3 \times 10^{22}} = 7 \times 10^{-10}$$

من الذرات . لاحظ أن شحنات صغيرة من فئة الميكروكولوم تؤدى إلى قوى يسهل قياسها بين أجسام كبيرة .

مثال 2-16 :

أوجد القوة المؤثرة على الشحنة q_2 التى فى الوسط فى الشكل 10-16 .

استدلال منطقى :

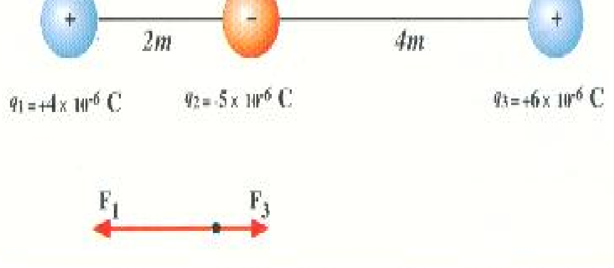
سؤال : أوجد القوة المؤثرة على الشحنة q_2 التى فى الوسط من الشكل 16-10 .

الإجابة : تؤثر كل من الشحنتين q_1 و q_3 بقوة تجاذب على q_2 . وهاتان القوتان تعارض أحداهما الأخرى كما فى الشكل 10-16 وسنطلق على القوة التى تؤثر بها q_1 على q_2 الرمز F_1 أما التى تؤثر بها q_3 فستكون F_3 .

سؤال : كيف يمكن حساب القوة المنفردة ؟

الإجابة : بتطبيق قانون كولوم على كل حالة منفردة ، كما لو كانت باقى الشحنات غير موجودة .

سؤال : كيف نتعامل مع إشارات الشحنات ؟



شكل 10-16:
تنجذب الشحنة الوسطى نحو q_1 بقوة هى F_1 ونحو q_3 ، بقوة هى F_3 .

الإجابة : لقد استخدمت بالفعل الإشارات لتحديد اتجاهات القوى وتستطيع الآن حساب مقادير القوى المعارضة ، إذا علمت أنك ستعتبر الفرق بين تلك المقادير .

الحل والمناقشة : يقدم قانون كولوم المقادير التالية للقوى المنفردة :

$$F_1 = \frac{(9\times10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)(4\times10^{-6}\ \text{C})(5\times10^{-6}\ \text{C})}{(2\ \text{m})^2}$$

$$= 0.04\ \text{N}$$

$$F_3 = \frac{(9\times10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)(5\times10^{-6}\ \text{C})(6\times10^{-6}\ \text{C})}{(4\ \text{m})^2}$$

$$= 0.02\ \text{N}$$

والقوة الصافية لهذه القوى المتعارضة هي باقي طرح المقدارين :

F_{net} (على q_2) $= 0.04\ \text{N} - 0.02\ \text{N} = 0.02\ \text{N}$

وتتجه هذه القوة نحو اليسار في الشكل 10–16 .

تمرين : أوجد القوة المؤثرة على شحنة مقدارها $4\mu C$. **الإجابة** : 4×10^{-12} N .

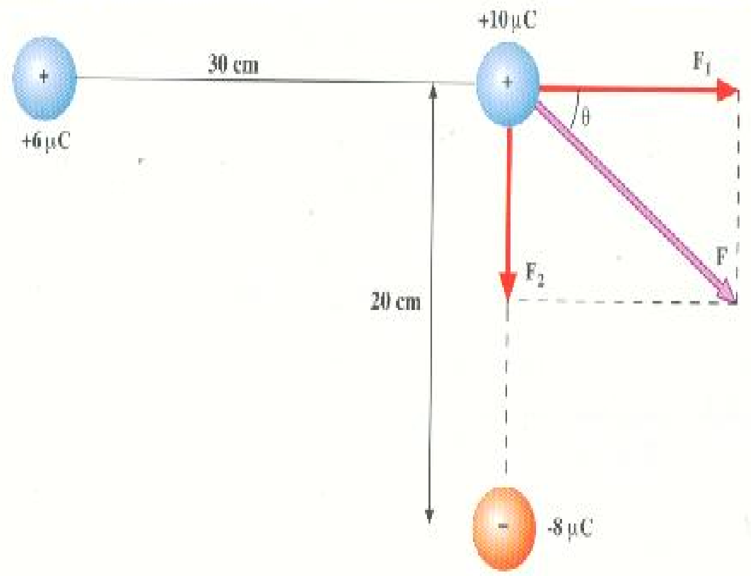
مثال 3-16 :

أوجد القوة المحصلة المؤثرة على شحنة مقدارها $+10\mu C$ موضحة في الشكل 11–16 .

استدلال منطقي :

سؤال : ما هي اتجاهات القوى المنفردة المؤثرة على الشحنة $+10\ \mu C$ ؟

الإجابة : القوة F_1 التي تؤثر بها الشحنة $+6\mu C$ هي قوة تنافر نحو اليمين . أما الشحنة $-8\mu C$ فتؤثر بقوة تجاذب F_2 إلى أسفل ؟



شكل 11–16:
لإيجاد القوة المحصلة **F** المؤثرة على الشحنة $+10\mu C$ لابد أن نضيف القوى المؤثرة عليها من جانب الشحنتين الأخريين .

سؤال : ما هي العلاقة التي ستعطينا مقادير هذه القوى ؟

الإجابة : قانون كولوم .

$$F_1 = \frac{(9\times10^9\,\text{N.m}^2/\text{C}^2)(+6\mu\text{C})(+10\mu\text{C})}{(0.3\text{ m})^2}$$

$$F_2 = \frac{(9\times10^9\,\text{N.m}^2/\text{C}^2)(-6\mu\text{C})(+10\mu\text{C})}{(0.2\text{ m})^2}$$

وكما حدث فى المثال السابق ، بمجرد أن تعين اتجاه القوى فإن كل ما تحتاجه هو مقدار كل منها ، بغض النظر عن الإشارة الجبرية .

سؤال : وكيف تجمع هذه المقادير ؟

الإجابة : إنهما متجهان متعامدان ، لذا تنطبق عليهما نظرية فيثاغورس . بالنظر إلى الشكل 11-16 نجد أن

$$F_{net} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} \quad \text{و} \quad \theta = \tan^{-1}\frac{F_2}{F_1}$$

الحل والمناقشة : مقادير القوى هى

$$F_1 = 6\text{ N} \quad \text{و} \quad F_2 = 18\text{ N}$$

وهذا يؤدى إلى

$$F_{net} = \sqrt{36+324}\ \text{N} = 19\text{ N}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{18.0}{6.00} = 72°$$

مثال 4-16 :

أوجد القوة المؤثرة على الشحنة $+20\mu C$ المبينة فى الشكل 12-16 .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هما اتجاها القوتين المؤثرتين على الشحنة $+20\mu C$ ؟

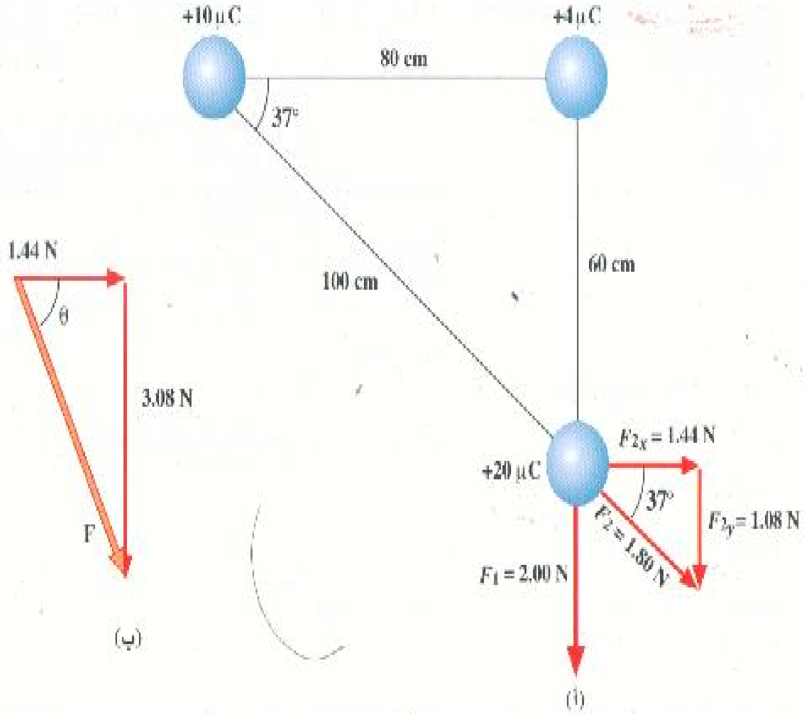
الإجابة : حيث أن الشحنات كلها موجبة لذا فكلتا القوتين تنافرية . ولهذا تكون إحدى القوى (F_1) متجهة إلى أسفل . أما الأخرى (F_2) فتميل بزاوية مقدارها 37° أسفل الخط الأفقى إلى اليمين .

سؤال : وكيف تُجمع هاتان القوتان ؟

الإجابة : يجب تحليل القوة F_2 إلى المركبتين x و y . بحيث تضاف المركبة y إلى F_1 . ومن ثم يمكن استخدام نظرية فيثاغورس لإيجاد المحصلة .

الحل والمناقشة : يقدم قانون كولوم المقدارين التاليين

$$F_1 = 2.0\text{ n} \qquad F_2 = 1.8\text{ N}$$



شكل 12–16:
تنتج القوى المتجهة المؤثرة على الشحنة $20\mu C$ القوة المحصلة F المبينة فى الشكل (ب) .

والقوة F_2 لها مركبتان هما

$$F_{2x} = (1.8\ N)\cos 37° = 1.4\ N$$

$$F_{2y} = (1.8\ N)\sin 37° = 1.1\ N$$

ولهذا تكون مركبتا القوة المؤثرة النهائية هما

$$F_y = 2.0\ N + 1.1\ N = 3.1\ N \quad \text{و} \quad F_x = 1.4\ N$$

ومن ثم

$$F = \sqrt{1.4^2 + 3.1^2}\ N = 3.4\ N$$

و

$$\theta = \tan^{-1}\frac{3.1}{1.4} = 66°$$

تمرين : أوجد مقدار القوة المؤثرة على الشحنة $10\mu C$. **الإجابة** : 2.3 N .

16-10 المجال الكهربى

لقد وجد أنه من المناسب مناقشة القوى الكهربية بدلالة مفهوم يطلق عليه **المجال الكهربى** . ويفى هذا المفهوم فى الكهربية بنفس الغرض الذى يفى به مفهوم مجال الجاذبية فى الميكانيكا . وقبل أن نبدأ فى مناقشة هذا المفهوم الجديد بالتفصيل سنقوم بمراجعة الموقف الأكثر شيوعًا لمجال الجاذبية .

لقد اعتدنا على حقيقة أن الكرة الأرضية تؤثر بقوة الجاذبية المتجهة نحو مركزها على الأجسام الموجود على السطح أو فوقه . ويؤثر القمر والكواكب الأخرى بقوى مماثلة

على الأجسام القريبة منها . ولكى نصف هذه التأثيرات فإننا نقول أن هناك **مجالاً للجاذبية** فى هذه المناطق . وعند أية نقطة فإن المجال يعتبر فى اتجاه القوة التى يتأثر بها الجسم هناك . وتكون شدة المجال متناسبة مع شدة تلك القوة .

ومن المناسب أن نخطط مجالات الجاذبية ؛ وبالنسبة للكرة الأرضية فإن مجال الجاذبية يبدو كما هو موضح فى الشكل 13-16 الذى يمكن تفسيره على النحو التالى : لو أن جسمًا وضع عند النقطة A ، فإنه سيتأثر بقوة فى اتجاه رأس السهم نحو مركز الأرض . أما الخطوط وتسمى **خطوط المجال** فإنها تشير إلى اتجاه جذب الأرض ؛ وهو ما يعتبر اتجاه مجال الجاذبية (وفى الحقيقة فإن الشكل 13-16 لابد وأن يرسم فى أبعاد ثلاثة . بحيث تتجه خطوط القوة دائما ومن جميع الاتجاهات نحو مركز الأرض) .

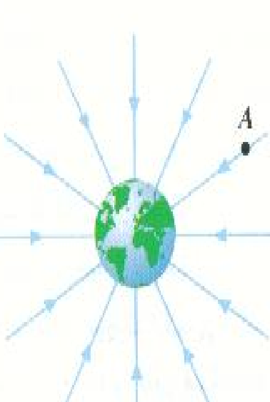
وخطوط المجال لا تمثل اتجاه القوة فحسب ولكنها تعتبر مؤشرًا على المقدار النسبى لها . ويمكنك ملاحظة ذلك فى الشكل 13-16 حيث تكون الخطوط أكثر تقاربًا من بعضها البعض بالقرب من الأرض ، حيث تكون القوة كبيرة ، وذلك بالمقارنة مع الوضع بعيدًا عن الأرض حيث تكون القوة أضعف . وسوف نعود إلى هذه السمة لخطوط المجال بعد أن نناقش المجال الكهربى ، الذى يصف القوى الكهربية التى تؤثر بها الأجسام المشحونة على بعضها البعض ويمثل المجال الكهربى القوة الكهربية التى تتأثر بها شحنة موجبة ساكنة . ولننظر كيف يمكنك المضى قدمًا نحو تعيين المجال الكهربى فى منطقة ما . فيمكنك ببساطة وضع جسم مشحون (وسنطلق عليه شحنة اختبار) فى المنطقة المذكورة . ثم نقوم بحساب القوة المؤثرة عليه من جانب الشحنات الأخرى كلها . على أن شحنة الاختبار تؤثر هى الأخرى بقوى على كل الشحنات الأخرى الموجودة بجوارها . . ولو أن هذه الشحنات كانت داخل فلز (معدن) فإنها ستبدأ فى التحرك . وللتغلب على هذه الصعوبة فسنتخيل أن شحنة الاختبار تتمتع بخاصية فريدة وهى أن : **شحنة الاختبار** ما هى **إلا شحنة وهمية لا تؤثر بأية قوى على الشحنات القريبة منها** . وسنقوم بالرمز لها بالحرف q_t . ويمكننا ـ من الناحية العملية ـ تقريب مفهوم شحنة الاختبار باستخدام شحنة ضئيلة للغاية لا تؤثر على الشحنات المجاورة إلا بقدر مهمل تمامًا .

سنعتبر اتجاه المجال الكهربى فى نقطة ما على أنه نفس اتجاه القوة المؤثرة على شحنة اختبار **موجبة** موضوعة فى تلك النقطة . ولنفترض مثلاً أن شحنة اختبار موجبة قد وضعت عند النقطة A فى الشكل 14-16 (أ) . إنها تنجذب قطريًا إلى الداخل ، كما يوضح السهم المرسوم عند A وبالفعل ، فإن القوة المؤثرة على شحنة الاختبار الموجبة ستتجه قطريًا إلى الداخل بغض النظر عن الموقع الذى تشغله بجوار الشحنة السالبة الموجودة بالمركز . وعلى هذا فإننا سنخمن أن المجال الكهربى يتجه كما هو موضح بالأسهم : **يتجه المجال الكهربى بالقرب من شحنة سالبة نحو الشحنة نفسها** .

ويمكننا أيضًا تعيين اتجاه المجال بالقرب من شحنة موجبة بنفس الأسلوب ، كما هو موضح فى الشكل 14-16 (ب) . وشحنة الاختبار الموجبة تدفع قطريًا إلى الخارج بتأثير

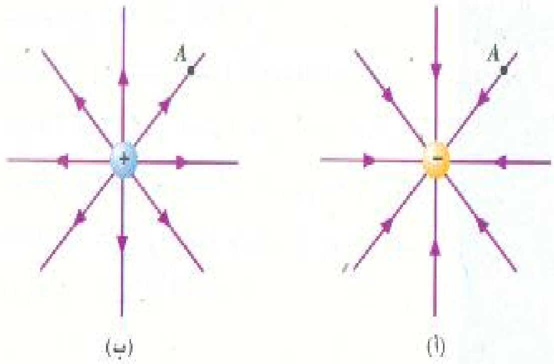


تعتبر صاعقة البرق دليلاً دراميًا على أنه حين يكون المجال الكهربى بين الشحنات الموجودة على سطح الأرض وتلك التى بالسحب ، كبيرًا بدرجة كافية فإن فيضًا من الشحنات يسرى . لاحظ صاعقة البرق الصغيرة عند هوائى التليفزيون إلى اليسار . . وحتى هذا من شأنه أن يتلف جهاز التليفزيون بالمنزل . . ولك أن تتخيل ماذا يمكن أن يحدث لو أن الصاعقة الرئيسية ضربت الهوائى بدلاً من أن تضرب الشجرة .



شكل 13-16:
يتجه مجال جاذبية الأرض قطريًا إلى الداخل ويشتد كلما اقتربنا من الأرض .

الشحنة الموجبة الموجودة بالمركز . ولذلك **يتجه المجال الكهربى بالقرب من شحنة موجبة قطريًا بعيدًا عن الشحنة .**



شكل 16-14:
يتجه المجال الكهربى قطريًا إلى الداخل نحو شحنة سالبة وإلى الخارج بعيدًا عن شحنة موجبة .

والخطوط الموجهة التى رسمناها فى الشكل 16-14 لبيان اتجاه الكهربى ، تسمى **خطوط المجال الكهربى** . وكما رأينا فإن خطوط المجال الكهربى تنبع وتتجه بعيدًا عن الشحنات الموجبة ، وتصب وتتجه نحو الشحنات السالبة .

ولكى يكتسب مفهوم المجال الكهربى معنى كميًا ، فإننا سنعرف كمية تسمى **شدة المجال الكهربى E** . ويكون اتجاه **E** عند أية نقطة معينة باعتباره كمية متجهة هو نفس اتجاه خطوط المجال الكهربى المارة خلال تلك النقطة . أما مقدار **E** فهو يساوى القوة التى تتأثر بها شحنة الاختبار مقسومة على مقدار تلك الشحنة q_t :

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_t \qquad (16\text{-}3)$$

وهكذا فإن وحدات **E** ستعرف على أنها N/C . وحيث أن **E** هى قوة لوحدة الشحنات ، فإننا دائمًا ما ننص على أنها قوة لوحدة شحنات الاختبار الموجبة . على أن علينا إدراك أنه عند قياس شدة مجال كهربى قد نستخدم شحنة أصغر بكثير من 1 C حتى لا نثير أى اضطراب للشحنات الأخرى الموجودة بجوارها .

وكما هو الحال مع مجال الجاذبية فإن الشدة النسبية للمجال الكهربى يمكن تقديرها عند فحص الشكل البيانى لخطوط المجال . فخطوط المجال فى الشكل 16-14 مثلاً ، أقرب ما تكون من بعضها البعض بالقرب من الشحنات . والقوة المؤثرة على وحدة شحنة الاختبار الموجبة (أو شدة المجال الكهربى) تكون أكبر ما يمكن بالقرب من الشحنات . أى أن شدة المجال الكهربى أكبر ما يمكن حيث تتقارب خطوط المجال إلى أقصى حد لها . ودائمًا ما نقدر قيمة شدة المجال فى منطقة ما ، وذلك بملاحظة كثافة خطوط المجال فى تلك المنطقة من خلال تخطيط للمجال الكهربى .

16-11 المجال الكهربى لشحنة نقطية

إننا مهتمون دائمًا بالمجال الكهربى الذى يولده أيون ما أو جسيمات مشحونة أخرى لها أبعاد ذرية ، وفى معظم الأحوال يمكننا اعتبار هذه الكيانات شحنًا نقطية . بل وحتى

الكرة المشحونة تسلك سلوك شحنة نقطية تحت ظروف معينة كما سنشير بعد قليل ؛ ولهذا أصبح من المهم لنا أن نتعرف على المجال الكهربى الذى تنشؤه شحنة نقطية .



شكل 15-16:
لإيجاد المجال الكهربى E عند النقطة P لابد أن نحسب القوة المؤثرة على شحنة اختبار موجبة موضوعة فى تلك النقطة .

لنفترض أننا نود حساب شدة المجال الكهربى عند نقطة P فى الشكل 15-16 والتى تقع على مسافة r بعيدًا عن شحنة نقطية موجبة q ونعلم أن المجال الكهربى للشحنة q يتجه قطريًا للخارج ، كما اتضح لنا من الشكل 14-16 (ب) ، ولذلك فإن $\mathbf{E}$ عند النقطة P ستكون فى الاتجاه المبين بالشكل . ولو تخيلنا وجود شحنة اختبار q_t عند النقطة P ، فإن القوة المؤثرة عليها ستعطى من قانون كولوم :

$$F = k\,\frac{q q_t}{r^2}$$

وإذا قسمنا الطرفين على q_t لنحصل على F/q_t ، وهى شدة المجال الكهربى لوجدنا :

$$\frac{F}{q_t} = k\frac{q}{r^2}$$

ومنها :

$$E = k\frac{q}{r^2} \qquad (16\text{–}4)$$

بالنسبة لشحنة نقطية .

وعندما تكون q موجبة فإن المجال الكهربى يتجه قطريًا إلى الخارج ، أما إذا كانت q سالبة فإن المجال سيتجه قطريًا إلى الداخل .

ويمكننا أن نجعل هذه العلاقة تمتد لتشمل موقفًا مهمًا آخر ؛ للمجال الكهربى حول كرة متجانسة الشحنة . عند مسافة كبيرة بعيدًا عن الكرة المشحونة (ولتكن الشحنة موجبة) فإنها تبدو كشحنة نقطية وعليه تكون خطوط المجال الناجمة عنها ممتدة قطريًا من الكرة إلى الفضاء من حولها . وحيث أن الشحنة على الكرة منتظمة ، لذا تكون الخطوط على أبعاد منتظمة من بعضها البعض حول الكرة . وكلما اقتربنا من الكرة فإن الخطوط لابد وأن تظل على أبعاد منتظمة من بعضها البعض . ولهذا فحتى بالقرب من الكرة فإن الخطوط تظل قطرية وشبيهة بتلك التى لشحنة نقطية . ومن ثم يكون المجال الناشىء عن كرة مشحونة بشكل منتظم ، شبيهًا بالمبين فى الشكل 14-16 والخاص بشحنة نقطية . ولنا الآن أن نستنتج أن :

المجال خارج كرة مشحونة بانتظام هو الذى تنشؤه شحنة نقطية مساوية لشحنة الكرة وموضوعة عند مركزها .

ولهذا تنطبق المعادلة 4-16 على كرة مشحونة بانتظام مثلما تنطبق على شحنة نقطية . على أنه لابد من ملاحظة أنها تنطبق فقط على المنطقة الواقعة خارج الكرة .

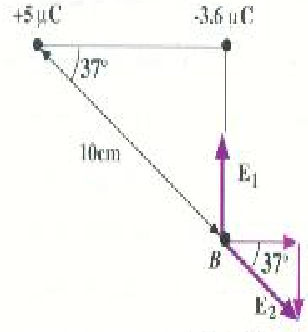
مثال توضيحى 1-16

أوجد شدة المجال الكهربى على بعد 50 cm من شحنة نقطية موجبة مقدارها 1×10^{-4} C .

استدلال منطقي : نود أن نحسب **E** عند النقطة P في الشكل 15-16 عندما تكون $r = 0.50$ m وتكون $q = 1 \times 10^{-4}$ C . وحيث أن q موجبة فإن شحنة الاختبار التي سنفترض وضعها عند P ستُدفع إلى الخارج تحت تأثير q . وعلى ذلك يكون اتجاه **E** كما هو مبين . ولإيجاد مقدار **E** ، فإننا نستعمل المعادلة :

$$E = k\frac{q}{r^2} = (9 \times 10^9 \text{ N/m}^2/\text{C}^2)\frac{1\times10^{-4}\text{ C}}{(0.50\text{ m})^2} = 3.6 \times 10^6 \text{ N/C}$$

تمرين : ما هي شدة المجال عند P إذا كانت الشحنة عبارة عن كرة مشحونة بانتظام ونصف قطرها 3.0 cm ؟ **الإجابة :** 3.6 × 10⁶ N/C .



شكل 16-16:
أوجد مبررًا للاتجاهات المبينة لكل من E_1 و E_2 . كيف يمكن إيجاد المجال الكلي عند B ، والناشيء بسبب الشحنتين ؟

مثال 16-5 :

أوجد مقدار **E** عند النقطة B في الشكل 16-16 والناشيء عن شحنتين نقطيتين .

استدلال منطقي :

سؤال : هل ينطبق مبدأ التراكب على حساب المجال الكلي عند B ؟

الإجابة : نعم ، يمكن حساب المجال عند B ، والناشيء عن كل شحنة من المعادلة 16-4 . ثم يجمع المجالان المنفردان متجهيًا .

سؤال : ما الذي يحدد اتجاه المركبات المتجهية للمجال ؟

الإجابة : لنتذكر أن المجال الناشيء عن شحنة موجبة يتجه قطريًا إلى الخارج بعيدًا عن الشحنة . أما المجال الناشيء عن شحنة سالبة فيتجه قطريًا نحو الشحنة . وعلى هذا يكون لدينا الإسهامان E_1 ، E_2 في الاتجاهين المبينين في الشكل 16-16 .

سؤال : ما الذي يحدد مقداري E_1 و E_2 ؟

الإجابة : المعادلة 16-4 تعطينا مقدار المجال الناشيء عن شحنة نقطية منفردة .

$$E_1 = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2)(-3.6\times10^{-6}\text{ C})}{(0.10\text{ m sin }37°)2}$$

$$E_2 = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2)(5\times10^{-6}\text{ C})}{(0.10\text{ m})}$$

الحل والمناقشة : مقادير شدة المجالات المنفردة هي

$E_2 = 4.5 \times 10^6$ N/C $\qquad$ $E_1 = 9.0 \times 10^6$ N/C

والمركبات المتعامدة للمجال E_2 هي

$$E_{2x} = E_2 \cos 37° = 3.6 \times 10^6 \text{ N/C}$$

$$E_{2y} = -E_2 \sin 37° = -2.7 \times 10^6 \text{ N/C}$$

وتكون مركبات **E** هى :

$$E_x = 3.6 \times 10^6 \text{ N/C}$$

$$E_y = (9.0 - 2.7) \times 10^6 \text{ N/C}$$

وهذا يعطى :

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 7.3 \times 10^6 \text{ N/C}$$

تمرين : إثبت أن اتجاه **E** هو $60.3°$ فوق الخط الأفقى .

مثال توضيحى 2-16

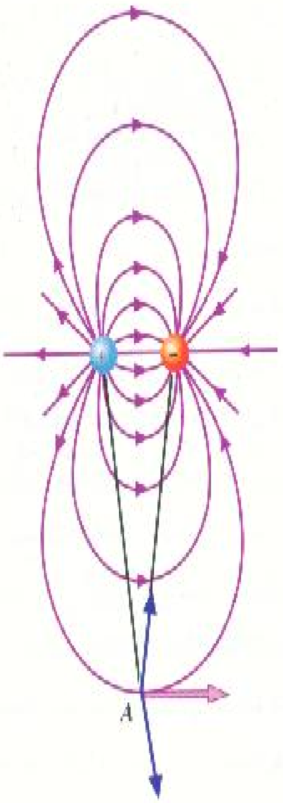
إذا وضعت شحنة مقدارها $q = +4 \times 10^{-7}$ عند النقطة B فى المثال 5-16 فما هى القوة التى ستؤثر عليها من المجال الكهربى ؟

استدلال منطقى : يمكننا استعمال قانون كولوم وحساب القوة كما فى الأمثلة السابقة . على أننا بمجرد أن نحسب المجال **E** عند النقطة B ، فإن القوة التى تتأثر بها أية شحنة q عندما توضع عند تلك النقطة ستكون ببساطة $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$. ولهذا فإن مقدار القوة هو :

$$F = (+4 \times 10^{-7} \text{ C})(7.3 \times 10^6 \text{ N/C}) = 2.9 \text{ N}$$

ويكون اتجاه القوة هو اتجاه $q\mathbf{E}$. وفى حالة شحنة موجبة فإن **F** تكون فى اتجاه **E** ، أما إذا كانت الشحنة سالبة فإن **F** تكون فى اتجاه **E-** أو فى اتجاه عكس **E** .

12-16 المجال الكهربى بسبب توزيعات مختلفة للشحنة : قانون جاوس



شكل 17-16:
تنبع خطوط المجال الكهربى عند الشحنة الموجبة وتنتهى على الشحنة السالبة . وعند أية نقطة مثل A يكون المجال الكهربى فى اتجاه مماس لخط المجال المار خلال تلك النقطة .

إن بإمكاننا أن نحصل على قدر كبير من التعمق فى مسألة ما بفحص تخطيط المجال الكهربى المتصل بها اتصالاً وثيقاً . وعلينا تذكر التفسيرات التالية :

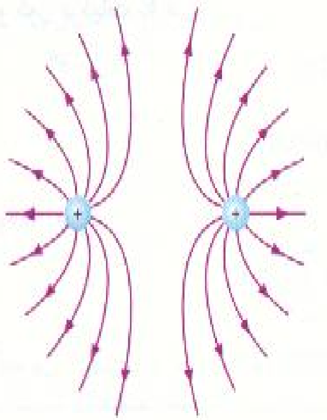
1 تبدأ خطوط المجال الكهربى عند الشحنات الموجبة وتنتهى عند الشحنات السالبة .

2 يكون المجال الكهربى أقوى ما يمكن عندما تكون خطوط المجال عند أقصى كثافة لها .

3 تكون القوة المؤثرة على شحنة موجبة موضوعة عند نقطة فى المجال متجهة بامتداد المجال عند تلك النقطة . أما القوة المؤثرة على شحنة سالبة فتكون متجهة فى عكس اتجاه المجال .

ويمكننا من حيث المبدأ تعيين اتجاه المجال الكهربى الناشىء عن الشحنات المبينة فى الشكل 16-16 عند أى عدد من نقط الفضاء المحيط بها . وقد يكون هذا العمل شاقاً من الناحية العملية ويستحسن القيام به بمساعدة الكومبيوتر . وإذا كانت النقط قريبة من بعضها البعض بدرجة كافية ، فإننا نستطيع أن نرسم مخططاً لاتجاه المجال من شأنه

أن يفيدنا بيانيًا بالكثير عن المجال الكهربى فى الفضاء المحيط بالشحنات ؛ والشكل 16-17 يعبر عن تخطيط مثل هذا المجال بالنسبة لشحنتين متضادتين ومتساويتين . وعليك أن تفحص عدة نقط فى الشكل حتى تقنع نفسك أن شحنة موجبة موضوعة هناك سوف تتأثر بقوة فى الاتجاه الذى تشير إليه خطوط القوة . ولكى تدرك كيفية عمل هذا ، اعتبر النقطة A . إذا وضعت شحنة اختبار موجبة عند A فإنها ستجد تنافرًا مع الشحنة الموجبة وتجاذبًا مع الشحنة السالبة . وستكون قوة التجاذب مساوية لقوة التنافر وذلك لأن شحنة الاختبار قريبة من الشحنة الموجبة بنفس درجة قربها من الشحنة السالبة . ومحصلة هاتين القوتين تكون مماسة لخط القوة عند A .



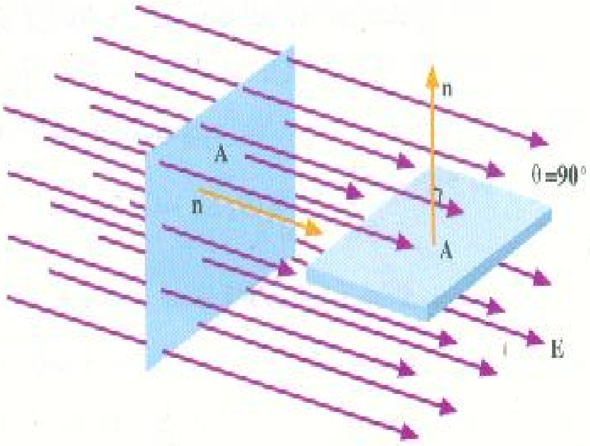
شكل 16-18:
تبدو خطوط القوة حول شحنتين متشابهتين وهى تتنافر مع بعضها البعض . لماذا لزم أن يكون الموقف هكذا ؟

وخريطة المجال القائم بجوار شحنتين متساويتين ومتشابهتين يوضحها الشكل 16-18 . ولابد أن تكون قادرًا على إثبات أن المجال يكون صفرًا عند نقطة منتصف المسافة بين الشحنتين .

وفى كثير من الحالات ذات الأهمية تكون الشحنة موزعة على أشكال لها هندسة بسيطة مثل الكرات والخطوط أو المستويات . وهناك وسيلة قوية للغاية يمكن من خلالها تبسيط حساب شدة المجال الكهربى فى مثل هذه الحالات وتعرف باسم **قانون جاوس** . ولكى نفهم المغزى الكامن وراء هذا القانون ، دعنا نعتبر سطحًا مغلقًا وموجودًا فى منطقة المجال الكهربى . وليس من الضرورى أن يكون هذا السطح . . سطحًا ماديًا لجسم حقيقى ، إذ قد يكون أى سطح **افتراضى** (ويطلق عليه **سطح جاوسى**) تختاره طالما كان يحيط بحجم ما من الفضاء . ولنفكر الآن فى تقسيم هذا السطح إلى عناصر مساحية صغيرة ΔA ، ، بحيث يكون لكل عنصر اتجاه يمكن وصفه بدلالة العمود المقام على ΔA ؛ $\mathbf{n}$ ، والذى يشير إلى خارج المنطقة التى يحيط بها السطح . ويكون لخطوط المجال الكهربى التى تمر خلال ΔA مركبة هى $E_\perp = E \cos \theta$ موازية للمتجه $\mathbf{n}$ ، حيث θ هى الزاوية المحصورة بين $\mathbf{E}$ و $\mathbf{n}$ (الشكل 16-19) . سنقوم الآن بضرب كل عنصر ΔA فى $E_\perp$ لنحصل على كمية نطلق عليها **التدفق الكهربى** أو **الفيض الكهربى** $(E_\perp \Delta A)$ المار خلال ΔA . لاحظ أن $E_\perp$ (ومن ثم التدفق) قد يكون موجبًا أو سالبًا اعتمادًا على قيمة $\cos \theta$ كما يوضح ذلك الشكل 16-20 . وحيث أن شدة المجال الكهربى تمثل بكثافة خطوط المجال ، فقد نعتبر التدفق (الفيض) بمثابة عدد خطوط المجال المارة خلال مستوى ΔA .

يوضح الشكل 16-21 مثالاً لسطح جاوسى مقسم إلى عناصر مساحية صغيرة ويقع فى منطقة بها مجال كهربى منتظم تشير إليه خطوط المجال . لاحظ أن التدفق خلال بعض عناصر المساحة سالب ، بينما يكون موجبًا خلال عناصر أخرى ، بل إنه يكون فى بعض الحالات صفرًا حين يتعامد كل من $\mathbf{n}$ و $\mathbf{E}$. والآن ، ما هى النتيجة التى نصل إليها عندما نجمع كل إسهامات الفيض هذه حتى نغطى السطح الجاوسى بأسره ؟ إن **قانون جاوس** هو الذى يتولى الإجابة :

إن مجموع كل إسهامات التدفق الكهربى المار من سطح مغلق يتناسب مع القيمة الإجمالية للشحنة المحتواة داخل ذلك السطح .



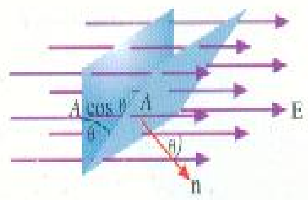
شكل 19-16:
إذا كانت المساحة الموجودة بالرسم هى A ، فإن التدفق الكهربى خلال المساحة اليسرى ، عندما يكون n موازيًا للمجال E ، هو EA . أما إذا كان n عموديًا على E فإن التدفق المار خلال المساحة اليمنى يكون صفرًا .

ففى حالة الشكل 21-16 ، لا يحتوى السطح على أية شحنة ولذا فإن التدفق الكلى خلال السطح يكون صفرًا ؛ بمعنى أنه على قدر ما يغادر المنطقة المحصورة من خطوط المجال ، على قدر ما يدخل إليها .

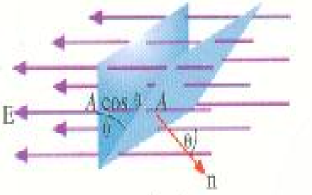
وحيث أن الشحنات هى منبع (أو منتهى) خطوط المجال الكهربى ، فإن الطريقة الوحيدة التى من خلالها يتكون تدفق خالص للمجال الكهربى خلال سطح مغلق ، هى أن يكون بداخل ذلك السطح شحنة خالصة .

والتعبير الرياضى الدقيق لقانون جاوس هو :

$$\Sigma (E\Delta A) = 4\pi k \, \Sigma q \text{ (المحتواة) } = \frac{Q_{tot} \text{ (المحتواة) }}{\epsilon_0} \qquad (16\text{-}5)$$



(أ)



(ب)

شكل 20-16:
تعتمد إشارة التدفق الكهربى على الزاوية المحصورة بين العمود المقام على المساحة والمجال الكهربى . ففى الشكل (أ) يكون التدفق هو $+(E\cos\theta)A$ بينما فى الشكل (ب) هو $-(E\cos\theta)A$. لاحظ أن هذه النتيجة هى نفس ما ستحصل عليه لو اعتبرت التدفق المار خلال المساحة الفعالة $A\cos\theta$.

وفى هذه المرحلة لو إنك ظننت أن قانون جاوس يثير البلبلة أكثر مما يفيد فقد تكون على حق . فالعادلة 5-16 قابلة للحل جبريًا فقط فى الحالات التى يكون توزيع الشحنات فيها ذا هندسة بسيطة بحيث يسمح لنا باختيار أسطح بسيطة . ولنعتبر ثلاثة من هذه المواقف البسيطة . تماثل كروى ، تماثل أسطوانى ، وتماثل استوائى .

التماثل الكروى

من أمثلة التماثل الكروى ، الشحنات النقطية ، والشحنات الموزعة بانتظام فوق الأسطح أو الحجوم الكروية . ولنعتبر شحنة كلية مقدارها $+Q$ منتشرة بانتظام فوق كرة مفرغة وخاوية ونصف قطرها R كما فى الشكل 22-16 (أ) . وعند أية نقطة ولتكن A خارج الكرة فإننا نستطيع استخدام اعتبارات التماثل لإثبات أن كل المركبات المستعرضة (أى المركبات العمودية على الاتجاه القطرى) للقوة والمؤثرة على شحنة اختبار ومن ثم اتجاه المجال **E** تتجه قطريًا نحو الخارج انطلاقًا من مركز الكرة . كما تتيح لنا اعتبارات التماثل أن نقول بأن كل النقط الواقعة عند نفس المسافة r من المركز تكون متكافئة . وإذا اخترنا السطح الجاوسى على هيئة كرة (ذات اللون الأخضر) . نصف قطرها r (يمر خلال A) ، فإننا نستطيع أن نضع النصوص التالية :

1 للمجال **E** نفس المقدار عند كل النقط الواقعة على السطح الجاوسى ؛ حتى وإن كنا لا نعرف ما هو ذلك المقدار بعد .

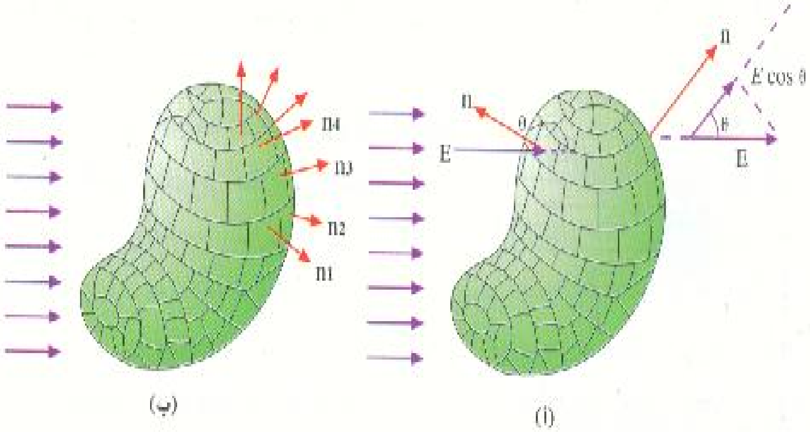
2 **E** عمودى على السطح الجاوسى عند كل النقط ولذا فهو يتجه قطريًا نحو الخارج انطلاقًا من مركز الكرة .

وتمكننا هذه المعلومات من حساب الطرف الأيسر من قانون جاوس :

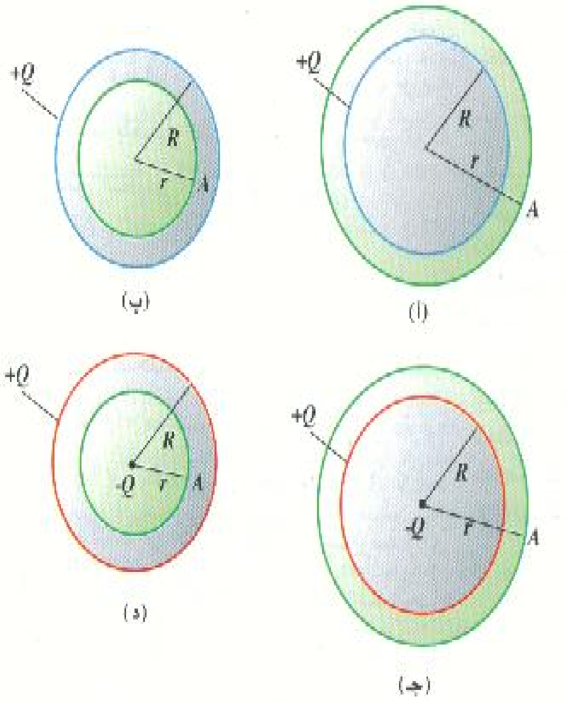
$$\Sigma(E_{\perp}\,\Delta A) = E\,\Sigma\,\Delta A = E\,(A_{\text{للكرة}}) = E\,(4\pi r^2)$$

أما المقدار الذى بالطرف الأيمن لقانون جاوس فهو مجرد الشحنة الإجمالية فوق الكرة المجوفة أو Q . وهكذا فإن قانون جاوس يؤدى إلى الحل الخاص بالمقدار E :

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \qquad r \geq R \qquad (16\text{–}6)\ (\text{أ})$$



شكل 16-21:
المتجه العمودى **n** يكون متعامدًا مع كل من مستوى كل عنصر مساحة صغيرة . وبالنسبة لعنصر من السطح الجاوسى المغلق فإن **n** يتجه إلى خارج المنطقة المحصورة (المحاطة) . والتدفق خلال كل عنصر للمساحة هو $(E\cos\theta)\Delta A$ (مأخوذًا عن إدوارد . م . بيرسل ، « الكهربية والمغناطيسية » ، من مقرر فيزياء بيركلى ، المجلد الثانى . دار نشر ماكجروهيل. نيويورك 1965 ، ص 22 . وهى هدية من مركز تطوير التعليم . نيوتن ، ولاية ماساتشوستس).



شكل 16-22:
تطبيق قانون جاوس على توزيع كروى التماثل للشحنة ممثلاً بكرة نصف قطرها R . (أ) السطح الجاوسى عندما $r > R$ (المميز باللون الأخضر) يحيط بشحنة كلية مقدارها $+Q$. ويكون المجال الكهربى عند النقطة A هو نفسه كما لو كانت الشحنة Q نقطية وموضوعة عند مركز الكرة . (ب) السطح الجاوسى عندما $r < R$ لا يحيط بأية شحنة ولذا فإن المجال الكهربى يكون صفرًا عند كل النقط مثل A . (جـ) السطح الجاوسى عند $r > R$ ولكنه يحيط بشحنة صافية مقدارها صفر ولذا فإن المجال الكهربى عند A يكون صفرًا . (د) عندما $r < R$ فإن السطح الجاوسى يحيط بشحنة مقدارها $-Q$ ، والمجال عند أية نقطة A داخل الشحنة الكروية يكون كما لو أن الشحنة الخارجية $+Q$ ليست موجودة على الإطلاق .

وهذا يوضح أنه ، **بالنسبة للنقط التى إما على التوزيع الكروى للشحنات أو خارجه** فإن المجال الكهربى سيكون نفس المجال الذى ينشأ كما لو كانت الشحنات كلها عند مركز الكرة . فإذا كانت الشحنة على الكرة هى $-Q$ فسنحصل على نفس النتيجة باستثناء أن اتجاه **E** سيكون قطريًا إلى الداخل .

دعنا الآن نختار سطحًا جاوسيًا داخل الكرة المجوفة ($r < R$) كما في الشكل 16-22 (ب) . إن نفس اعتبارات التماثل لازالت قائمة والطرف الأيسر من قانون جاوس هو أيضًا $E\,(4\pi r^2)$. ولكن بما أننا نعتبر الكرة خاوية ، فإن السطح **لا يحتوى بداخله على أية شحنات** ولذا يصبح قانون جاوس كالتالي :

$$E\,(4\pi r^2) = 0 \qquad r < R \qquad \text{(ب) (16-6)}$$

بما يعنى أن :
$$E = 0$$

عند كل النقط داخل الكرة المشحونة المجوفة .

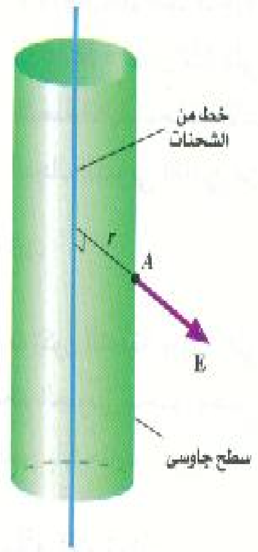
أما في الشكل 16-22 جـ ، د ، فقد قمنا بوضع شحنة نقطية $-Q$ في مركز نفس الكرة المشحونة ، ويحتفظ هذا الوضع بالتماثل الكروى السابق بأكمله . وإذا اعتبرنا نفس السطح الجاوسى كما سبق لوجدنا أن السطح الخارجى لا يحيط بأية شحنة صافية ، بينما يحيط السطح الداخلى بشحنة صافية مقدارها $-Q$. ويمكننا على الفور استنتاج أن المجال الناشئ عن توزيع الشحنات في الشكل 16-22 جـ و د هو :

$$E = \begin{cases} 0 & r \geqslant R \\ \dfrac{-Q}{4\pi\epsilon_0} & r < R \end{cases}$$

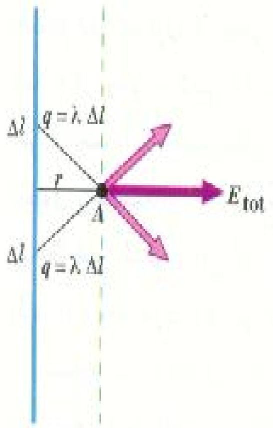
التماثل الأسطوانى

دعنا الآن نعتبر خطًا مستقيمًا وزعت عليه شحنة (سواء موجبة أو سالبة) بشكل منتظم كما هو في الشكل 16-23 . ويمكننا تمييز هذه الشحنة **بكثافتها الخطية** أو بمقدار الشحنة لوحدة الأطوال (المتر) . والرمز المستعمل عادة للكثافة الخطية للشحنة هو λ وتقاس بوحدات كولوم لكل متر . وسوف نختار نقطة ما A على مسافة عمودية r من الخط . ولو أن الخط كان ممتدًا بشكل « لا نهائى » فى كلا الاتجاهين فإننا نستطيع عندئذ أن نلجأ إلى بعض الاعتبارات التماثلية المبسطة . فمن الناحية العملية فإن الطول اللانهائى يعنى أن طول خط الشحنات أكبر بكثير جدًا من المسافة r . وتكون المركبات المستعرضة للقوة والمؤثرة على شحنة اختبار موجبة موضوعة عند A من جانب قطاعات الشحنة الخطية المختلفة سيلاشى بعضها بعضًا كما هو موضح فى الشكل 16-23 (ب) . وستكون القوة المؤثرة على q_t ومن ثم $\mathbf{E}$ فى اتجاه قطرى فقط منطلقة من أو إلى الخط اعتمادًا على ما إذا كانت الشحنة الخطية موجبة أو سالبة . ومرة أخرى فإن التماثل يتيح لنا أن نعتبر أيضًا أن **كل** النقط الواقعة على نفس المسافة r تكون متكافئة ولذا فإن لها نفس قيمة المجال E . وسوف تقع هذه النقط على سطح **أسطوانة** يكون محورها هو الشحنة الخطية .

إذا أردنا تطبيق قانون جاوس على توزيع الشحنة هذا فإننا نختار السطح الجاوسى على هيئة أسطوانة قصيرة نسبيًا ، ذات طول L ونصف قطر r ، كما هو مبين باللون الأخضر فى الشكل 16-23 (أ) . وباستعمال اعتبارات التماثل نستطيع أن نستنتج أن :



(أ) رسم منظور



(ب) منظر جانبى

شكل 16-23:
خط طويل جدًا يحمل شحنة ذات كثافة خطية منتظمة λ . ويكون السطح الجاوسى المناسب فى هذه الحالة عبارة عن أسطوانة تتمحور حول الشحنة الخطية . لاحظ فى (ب) أن المساهمات فى المجال الكهربى الموازى لخط الشحنات من جانب أزواج العناصر النقطية المختارة تكون متماثلة بحيث تتلاشى ولهذا فإن المجال يكون قطريًا ومتجهًا إلى الخارج منطلقًا من الشحنة الخطية .

1 المجال **E** ليس له مركبات عمودية عند سطحي نهايتي الأسطوانة ، ولهذا فإن $\Sigma(E_{\perp}\Delta A) = 0$ لتلك الأجزاء من السطح .

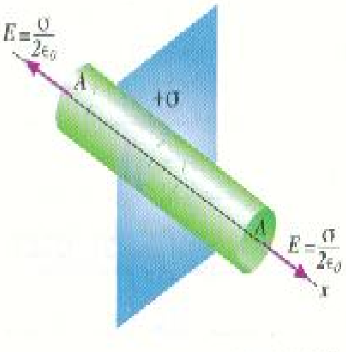
2 $\Sigma(E_{\perp}\Delta A) = E(2\pi rL)$ على المساحة الجانبية للأسطوانة .

3 الشحنة الكلية المحاطة بالأسطوانة هي $Q = \lambda L$ وهكذا فإن قانون جاوس يقدم لنا قيمة المجال الكهربى الناشئ عن خط لا نهائي ومنتظم من الشحنات :

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \qquad (16\text{-}7)$$

عندما تكون الشحنة موزعة على قشرة أسطوانية نصف قطرها R فإننا نستطيع اختيار السطح الجاوسي داخل وخارج R لحساب E بطريقة مشابهة لما حدث في القسم الخاص بالشحنات الكروية .

التماثل الاستوائي



شكل 24-16:
مستوى يحتوى على كثافة سطحية منتظمة للشحنة σ .

وكمثال أخير على فائدة قانون جاوس فإننا سنقوم الآن بدراسة حالة شحنة موزعة بانتظام على مستوى لا نهائي كما هو موضح في الشكل 24-16 . ومرة أخرى نذكر بأن كلمة « لا نهائي » تعني أننا سنظل على مسافة قريبة بما فيه الكفاية من المستوى عند إجراء الحسابات بحيث تكون المسافة x بيننا وبين المستوى أقل بكثير جدًا من أبعاد المستوى وأننا سنعتبر منطقة بعيدة تمامًا عن حواف المستوى . ونستطيع أيضًا أن نميز الشحنة على المستوى على أن لها كثافة سطحية منتظمة وسنرمز للكثافة السطحية للشحنات بالرمز σ (وهو حرف إغريقي ينطق « سيجما ») وتقاس بوحدات كولوم لكل متر مربع .

وسنعتبر ـ مرة أخرى ـ أن المركبات المستعرضة للقوة المؤثرة عل شحنة اختبار موجبة عند مسافة x من المستوى يلاشي بعضها بعضًا . فبالنسبة لكل مساحة صغيرة من الشحنة فوق أو إلى يمين q_t ستكون هناك شحنة مساوية تحت أو إلى اليسار بحيث تلغى كل المركبات ما عدا مركبة القوة العمودية المتجهة بعيدًا عن أو في اتجاه المستوى . كما أن كل النقط الواقعة عند نفس المسافة من المستوى اللانهائي ستكون متكافئة والسطح الجاوسي المناسب في هذه الحالة من التماثل يوضحه الشكل 24-16 وهو بمثابة أسطوانة مساحة قطعها المستعرض A ومحورها متعامد معع المستوى المشحون . وسنقوم الآن بعرض الملاحظات التالية :

1 المجال **E** ليست له مركبات متعامدة مع الجوانب الأسطوانية لهذا السطح ، ولهذا فإن $\Sigma E_{\perp}\Delta A = 0$ لهذا الجزء من السطح .

2 المجال **E** متعامد تمامًا مع غطائى طرفي السطح الأسطواني وله قيمة ثابتة عبر هذه المساحات ، ولذا تكون لغطائي الطرفين $\Sigma(E_{\perp}\Delta A) = 2\,(EA)$.

3 تكون الشحنة المحصورة داخل السطح الجاوسي هي σA ويقدم لنا قانون جاوس النتيجة التالية للمجال الكهربى الناشئ عن مستوى منتظم من الشحنة :

$$E = \frac{\sigma}{2\,\epsilon_0} \qquad (16\text{-}8)$$

لاحظ أن هذه النتيجة لا تعتمد على موقع x !

ولابد أن تكون مدركاً لمدى صعوبة الحصول على هذه النتائج عند تطبيق قانون كولوم مباشرة ؛ بينما نتائج قانون جاوس بسيطة ومباشرة عند الاستخدام .

مثال 16-6 :

يلاحظ حدوث شرارة كهربية خلال الهواء عندما تزيد شدة المجال الكهربى عن نحو 3×10^6 N/C . (ويسمى هذا المقدار **الشدة الكهربية** للهواء) . ما مقدار الشحنة بالتقريب والتى يمكن أن تحملها كرة معدنية قطرها 10.0 cm قبل حدوث شرارة كهربية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : بالنسبة لكرة مشحونة بانتظام ، ما هو التعبير الرياضى للمجال الكهربى عند سطح الكرة ؟

الإجابة : توضح المعادلة 16-6 (أ) أن $E = Q/4\pi\epsilon_0 r^2$ طالما كانت $R \gg r$ ولهذا يمكنك استخدام هذا التعبير عند $r = R$.

سؤال : ما هو شرط الحصول على أقصى شحنة قبل حدوث الشرارة ؟

الإجابة : عليك وضع $r = R$ ، ثم استعمل القيمة القصوى لشدة المجال الكهربى $E_{max} = 3 \times 10^6$ N/C ، وهو ما يناظر أقصى شحنة .

الحل والمناقشة : باستخدام البيانات العددية المعطاة ، نحصل على :

$$3 \times 10^6 \text{ N/C} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2)\ \frac{Q}{(0.050\text{ m})^2}$$

أى أن كرة بهذا الحجم تستطيع حمل نحو 1 μC من الشحنة .

تمرين : ما هى شدة المجال الكهربى على بعد 75 cm من مركز الكرة عندما تكون شحنتها 0.5 μC ؟ **الإجابة** : 8000 N/C .

مثال 16-7 :

يوضح الشكل 16-25 صفيحتين كبيرتين (لا نهائيتين) من الشحنة ، تواجه إحداهما الأخرى . وللصفيحتين نفس الكثافة السطحية للشحنة المتضادة $+\sigma$ و $-\sigma$. أوجد التعبير الرياضى للمجال الكهربى **E** الناشئ عن هذه الشحنات فى ثلاثة مواقع : بين اللوحين ، إلى يمين اللوح الأيمن ، وإلى يسار اللوح الأيسر .

استدلال منطقى :

سؤال : هل استخدم قانون جاوس فى هذه الحسابات ؟

الإجابة : حيث أننا قد استخدمناه بالفعل بالنسبة لصفيحة منفردة من الشحنة فإنك تستطيع استخدام نفس النتيجة وكذا مبدأ التراكب .

سؤال : ما هى مقتضيات مبدأ التراكب ؟

الإجابة : إنه يقتضى أنك تستطيع اختيار أية نقطة تريدها ثم تجمع إسهامات كل صفيحة فى قيمة المجال عند تلك النقطة كما لو كانت الصفيحة الأخرى غير موجودة .

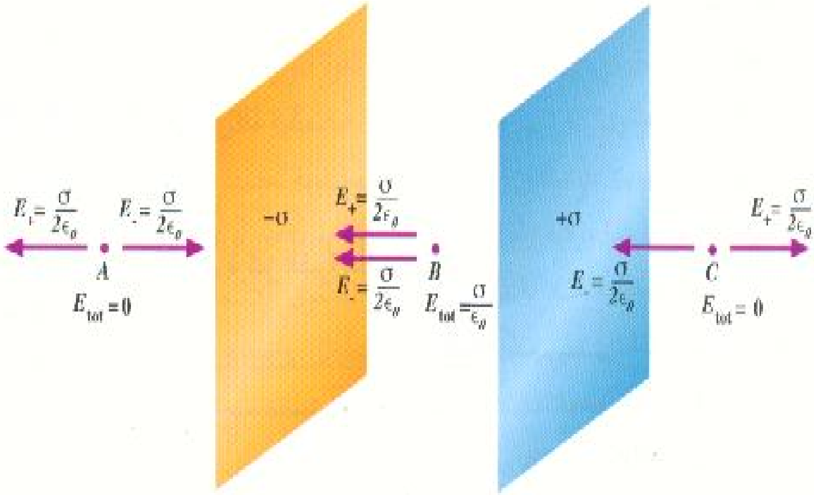
سؤال : ما هى الإسهامات المنفردة فى المجال **E** ؟

الإجابة : المعادلة 8-16 تعطينا $E = \sigma/2\epsilon_0$ عند **أية نقطة تختارها** وتكون اتجاهات المجالات نحو الشحنات السالبة وبعيدًا عن الشحنات الموجبة ، كما هو الحال دائما .

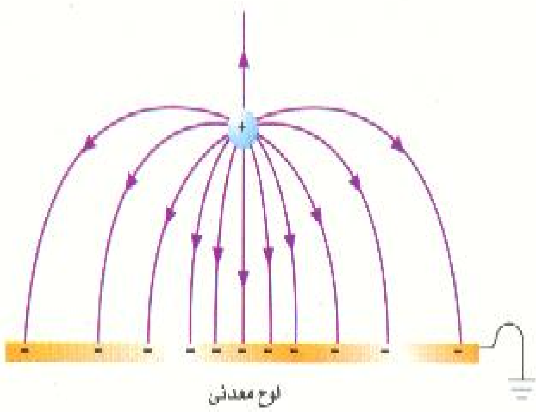
الحل والمناقشة : عند أية نقطة ، تسهم الصفيحتان بشكل متساوٍ فى مقدار E . وكما هو واضح فى الشكل 25-16 ، فإن الإسهامات متضادة فى الاتجاه ويلغى أحدها الآخر فى كل النقط إلى يمين وإلى يسار الصفيحتين معًا كما فى النقطتين A و C . أما فى أية نقطة مثل B تقع بين الصفيحتين فإن الإسهامين يكونان فى نفس الاتجاه . ولهذا يكون لدينا :

$$E = \begin{cases} 0 & \text{عند كل النقط التى ليست بين الصفيحتين} \\ 2\left(\dfrac{\sigma}{2\epsilon_0}\right) = \dfrac{\sigma}{\epsilon_0} & \text{عند كل النقط بين الصفيحتين} \end{cases}$$

ويكون اتجاه **E** بين الصفيحتين من الصفيحة الموجبة نحو السالبة .



شكل 25-16 : لوحان مشحونان بشحنات متضادة ، وعندما تكون مساحاتهما أكبر بكثير من المسافة التى تفصلهما فإن E يكون مساويًا σ/ϵ_0 بينهما وصفرًا خارجهما .



شكل 26-16: تجذب الشحنة الموجبة الشحنات السالبة نحو سطح اللوح المعدنى . لماذا كانت خطوط المجال متعامدة مع اللوح عند سطحه ؟

16-13 الموصلات في مجالات كهربية

الإلكترونات كما رأينا في القسم 4-16 حرة في أن تتحرك خلال مادة ما موصلة استجابة للقوة الكهربية . افترض أن كرة صغيرة موجبة الشحنة موجودة فوق لوح معدني كبير كما في الشكل 26-16 . ستنجذب إلكترونات اللوح المعدني بواسطة الشحنة الموجبة . وعلى الرغم من عدم تمكنها من مغادرة اللوح إلا أنها ستميل إلى الحركة نحو الشحنة الموجبة ولذا فإنها تتجمع عند سطح اللوح أقرب ما يكون من الكرة . ولو أن اللوح موصل بالأرض ، فإن الشحنة السالبة ستسرى من الأرض إلى داخل اللوح لتحل محل الإلكترونات التي دفعت إلى الحركة لتصبح أقرب ما يمكن من الكرة المشحونة . ولكن اللوح وهو في الأصل متعادل ، سيكتسب الآن شحنة سالبة صافية مساوية عدديًا للشحنة الموجبة مما ينتج عنه نمط المجال الكهربي المبين في الشكل 26-16 .

ويتم ترتيب الشحنات فوق اللوح بسرعة حيث تتهيأ الظروف حتى لا يحدث تحرك لمزيد من الشحنات داخل المعدن . ويسمى هذا الوضع **الظرف الكهروستاتيكي** ، ويقتضي بروز الحقيقة كبيرة الأهمية التالية :

في الظروف الكهروستاتيكية لا يمكن للمجال الكهربي أن يوجد داخل الموصل .

ومن النتائج المهمة للمقولة السابقة أن :

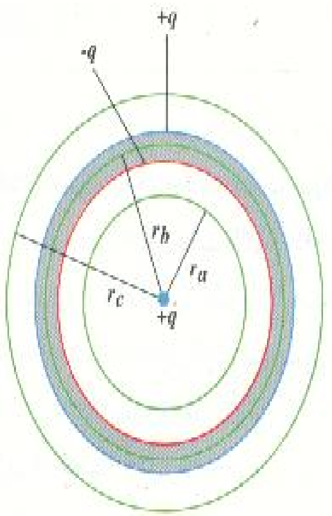
في الظروف الكهروستاتيكية يكون المجال الكهربي الخارجي متعامدًا مع سطح الموصل عند جميع النقط .

والبرهان على صحة هذه المقولة يكمن في حقيقة أن مركبة **E** الموازية لسطح الموصل ستجعل الإلكترونات تتحرك بطول السطح ، ومرة أخرى ، حتى يتحقق ظرف استاتيكي (ساكن) . أما مركبة **E** العمودية فليست قوية بدرجة كافية (إلا في الظروف القصوى) حتى تنتزع الإلكترونات خارج سطح المعدن .

لاحظ أنه طبقًا لهذه الملاحظات فإن خطوط المجال الكهربي في الشكل 26-16 متعامدة على سطح اللوح ، كما أنها تنتهي عند السطح . كما أن عليك تذكر أن هذه القواعد تفترض حرية الإلكترونات في الحركة ولهذا فهي لا تنطبق على العوازل .

مثال 16-8 :

يوضح الشكل 27-16 شحنة $+q$ معلقة عند مركز قشرة معدنية كروية مجوفة ونصف القطر الخارجي لهذه القشرة هو R_2 ونصف القطر الداخلي R_1 . استخدم قانون جاوس لتعيين شدة المجال الكهربي : (أ) بين الشحنة والسطح الداخلي للكرة (عند r_a) ، (ب) بين السطحين الداخلي والخارجي للكرة (r_b) و (جـ) خارج الكرة (r_c) . (د) إثبت أن شحنات مقدارها $-q$ و $+q$ تستحث على السطحين الداخلي والخارجي للكرة على التوالي .



شكل 27–16:
لو وضعت شحنة نقطية $+q$ عند مركز كرة مجوفة ، فإن شحنة $-q$ سوف تستحث على السطح الداخلي للكرة . ويمكن إيضاح ذلك عند اعتبار الأسطح الجاوسية الكروية داخل التجويف الكروى (r_a) ، وخارج الموصل (r_c) . وتتميز هذه الأسطح الجاوسية في الشكل باللون الأخضر . تذكر أن المجال الكهربي لابد وأن يكون صفرًا في كل بقعة داخل المادة الموصلة .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يمكن الاستقرار على سطح جاوس الذى يجب استخدامه ؟

الإجابة : المسألة ذات تماثل كروى ولهذا لابد أن تكون الأسطح الجاوسية على هيئة كرات متمركزة حول $+q$. وأنصاف أقطار الأسطح الجاوسية التى عليك اختيارها فى كل من المناطق التى تود أن تحسب فيها قيمة المجال هى المميزة بالحروف r_a ، r_b ، r_c فى الشكل 27–16 .

سؤال : ما الذى تقدمه $\Sigma E_\perp \Delta A$ لى بالنسبة للأسطح الجاوسية هذه ؟

الإجابة : يمكنك استخدام اعتبارات التماثل الواردة فى القسم 12–16 . وبالنسبة للمناطق الثلاث ، تكون النتيجة هى :

$$\Sigma E_\perp \Delta A = E(4\pi r^2)$$

حيث يتجه E قطريًا .

سؤال : ما هى الشحنة الكلية المحاطة بكل سطح جاوسى ؟

الإجابة : هذا هو السؤال الإيضاحى بالنسبة لسطح جاوسى نصف قطره r_a فإن من الواضح $+q$ = $Q_{\text{المحاطة}}$. وبالنسبة لسطح جاوسى نصف قطره r_c خارج الكرة ، فإننا نحصل على نفس النتيجة ، لأن الكرة نفسها لا تحتوى على شحنة صافية . أما فى داخل القشرة ، عند r_b ، فإننا لا نستطيع أن نجيب ببساطة بمجرد النظر .

سؤال : يقع السطح الجاوسى الذى نصف قطره r_b داخل الموصل . ما هى المعلومة التى يمكن استخلاصها من ذلك ؟

الإجابة : لابد أن يكون المجال فى تلك النطقة صفرًا ، لأننا نفترض موقفًا (أو ظرفًا) كهروستاتيكيا .

سؤال : ما الذى يمكن استخلاصه فيما يتعلق بالشحنة من هذه الحقيقة ؟

الإجابة : حيث أن E لابد وأن تكون صفرًا فى جميع نقط الموصل فإن قانون جاوس يتطلب أن تكون $Q_{\text{المحاطة}} = 0$ بالنسبة لأى سطح جاوسى فيما بين R_1 و R_2 وحتى نصل إلى $r = R_1$. ولكى تكون $Q_{\text{المحاطة}} = 0$ فلابد أن تستقر شحنة سالبة فى مكان ما

داخل السطح الجاوسي حتى تلغى أثر $+q$ الموجودة عند مركز الكرة . وبتقليص نصف قطر السطح الجاوسي إلى $r = R$ فيمكننا إلغاء إمكانية وجود شحنة سالبة صافية مستقرة في مكان ما في باطن الموصل ، واستنتاج أن **الشحنة $-q$ تقع على السطح الداخلي للموصل** .

سؤال : وإلى ماذا يشير هذا بالنسبة للشحنة على السطح الخارجي ؟

الإجابة : بما أن الكرة متعادلة ولا تحمل شحنة صافية ، فإن $+q$ لابد وأن تستقر على السطح الخارجي ، ويتفق هذا مع نتائج قانون جاوس بالنسبة للمنطقة الواقعة خارج الكرة .

الحل والمناقشة : سنلخص فيما يلي قيم المجال الكهربي

$$E = \begin{cases} \dfrac{kq}{r^2} & r < R_1 \\ 0 & R_1 \leqslant r \leqslant R_2 \\ \dfrac{kq}{r^2} & r \geqslant R_2 \end{cases}$$

إن شحنة مقدارها $-q$ ستُحث على الحركة نحو السطح الداخلي للكرة المعدنية ، بينما تتحرك شحنة $+q$ على السطح الخارجي . وفي حالة التماثل هذه تتوزع الشحنات السطحية بانتظام على سطحي الكرة . هل تستطيع أن تفكر مليًا في أن نفس الشحنات قد تستحث بغض النظر عن شكل الموصل المجوف ؟ (في حالة أي شكل اعتباطي ، فإنها لن تظل موزعة بانتظام) .

16-14 الألواح المعدنية المتوازية

يعتبر المجال الكهربي بين لوحين معدنيين مشحونين بشحنتين متضادتين ذا أهمية خاصة في دراسة الكهربية ، كما سيتضح لنا كلما تقدمنا في دراستنا . ونوضح بالشكل 16-28 (أ) موقفًا نموذجيًا . إن الشحنات التي على اللوحين مصدرها بطارية (كالتي سنتعرض لها في الفصل القادم) وتعطي البطارية أحد اللوحين شحنة موجبة وتعطي الآخر شحنة سالبة كما هو واضح من الرسم التخطيطي في الشكل 16-28 (ب) . وبما أن الشحنات تتجاذب إلى بعضها البعض ، لذا فإنها تستقر - أكبر ما يمكن - على الأسطح الداخلية للوحين (لاحظ أن الرمز ─┤+|−├─ هو ما يشيع استعماله للدلالة على البطارية) .

لقد حسبنا المجال الكهربي المرتبط بهذا التشكيل للشحنات في المثال 16-7 . وفيما عدا تلك المناطق بالقرب من حواف اللوحين ، فإن المجال يكون منتظمًا وثابتًا :

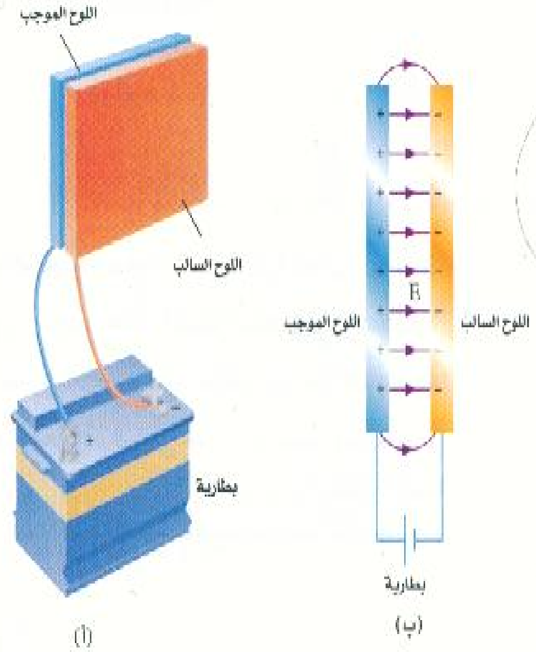
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

حيث σ هي الشحنة المنتظمة لوحدة المساحات على اللوحين .

ولنتذكر الآن من المعادلة 16-3 أن القوة المؤثرة على الشحنة q الموضوعة في مجال كهربي $\mathbf{E}$ هي

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

وبما أن E ثابت ، فإن القوة المؤثرة على أية شحنة بين اللوحين ستكون هي الأخرى ثابتة . وهكذا فإن اللوحين المشحونين المتوازيين يعتبران وسيلة مناسبة لإنشاء قوى ثابتة تؤثر على الشحنات . على أن هذا ليس صحيحًا بالنسبة لأى من توزيعات الشحنة الأخرى التى تناولناها . ونتيجة لهذا فإن الشحنات الحرة الواقعة بين لوحين مشحونين متوازيين ستتأثر بعجلة ثابتة طبقًا لقانون نيوتن الثانى ، $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$. وبالنسبة للشحنات الموجبة فإن القوة تكون بامتداد اتجاه المجال ، أما بالنسبة للشحنات السالبة فالقوة فى اتجاه عكس اتجاه المجال .



شكل 28-16:
تقوم البطارية بوضع شحنات متساوية ومتضادة فى الإشارة على اللوحين المعدنيين .

مثال 9-16 :

لوحان متوازيان معدنيان تفصلهما مسافة 3 mm ويحملان كثافتى شحنة متساويتين ومتضادتين ، هما $\pm 2\,\mu\,\mathrm{C/m^2}$. وقد أطلق بروتون ($q = e$ و $m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) من حالة السكون عند اللوح الموجب . ما هى سرعة البروتون قبل أن يصطدم باللوح السالب مباشرة ؟ اعتبر الحيز بين اللوحين فراغًا .

استدلال منطقى :

1

سؤال : ما هو المبدأ الذى سيحدد السرعة المكتسبة ؟

الإجابة : إنها معادلات الحركة بالنسبة لعجلة ثابتة ، والتى تشتق من قانون نيوتن الثانى ، وعلى وجه التحديد ، المعادلة التى تربط بين تغير السرعة مع المسافة المقطوعة : $v^2 = v_0^2 + 2ax$. وقد عرفنا أن $v_0 = 0$ ، ونود إيجاد v عندما تكون $x = 3$ mm .

سؤال : من أين نحصل على قيمة العجلة ؟

الإجابة : كما هو الحال دائمًا فإن $a = F_{\text{net}}/m$ وقيمة m معطاة .

سؤال : وما الذى يحدد قيمة القوة الصافية F_{net} المؤثرة على البروتون ؟

الإجابة : إن القوة الوحيدة بالمسألة هى القوة الكهربية التى ينشؤها المجال بين اللوحين $F = qE$ ، و $q = e$ فى هذه الحالة .

سؤال : ما هى قيمة شدة المجال E ؟

الإجابة : $E = \sigma / \epsilon_0$ ونعلم كلاً من σ و ϵ_0 .

الحل والمناقشة : لنحسب أولاً المجال :

$$E = \frac{2 \times 10^{-6}\ C/m^2}{8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N.m^2}$$

$$= 2.26 \times 10^5\ N/C$$

(تأكد من استطاعتك اشتقاق الوحدات التى فى الإجابة) . ثم احسب القوة المؤثرة على البروتون :

$$F = eE = (1.6 \times 10^{-19}\ C)(2.26 \times 10^5\ N/C) = 3.62 \times 10^{-14}\ N$$

ثم أوجد العجلة (التسارع)

$$a = \frac{F}{m} = \frac{3.62 \times 10^{-14}\ N}{1.76 \times 10^{-27}\ kg}$$

$$= 2.17 \times 10^{13}\ m/s^2$$

ثم عين السرعة النهائية :

$$v = (2ax)^{1/2} = [\,2(2.17 \times 10^{13}\ m/s^2)\,(0.003\ m)]^{1/2}$$

$$= 3.61 \times 10^5\ m/s$$

لاحظ أنه على الرغم من أن الشحنة والقوة المؤثرة صغيرتان للغاية إلا أن الكتلة الضئيلة للبروتون تسمح له باكتساب سرعة كبيرة جداً .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادراً على :

1 تعريف (أ) الموصل ، (ب) العازل ، (جـ) الإلكترون الحر ، (د) الأرض الكهربية ، (هـ) الشحنة المستحثة ، (و) قانون كولوم ، (ز) خطوط المجال الكهربى ، (ح) شدة المجال الكهربى .

2 أن تعرف مقدار وإشارة الشحنة على كل من الإلكترون والبروتون .

3 أن تصف بطريقة كمية ، كيف تقوم الشحنات داخل جسم معدنى بإعادة توزيع نفسها عندما يقترب جسم مشحون ، وأن تشرح كيف يمكن شحن جسم بالتوصيل وبالحث .

4 أن تذكر النتائج المستخلصة من تجربة دلو الثلج لفاراداى .

5 أن تستخدم قانون كولوم فى إيجاد القوة المؤثرة على شحنة نتيجة وجود شحنات نقطية قريبة .

6 أن تحسب شدة المجال الكهربى عند نقطة لوجود عدة شحنات نقطية محددة .

7 أن تخطط خطوط المجال الكهربى بالقرب من أجسام مشحونة بسيطة .

8 أن تذكر قانون جاوس بالكلمات وبالتعبير الرياضى ، ثم تطبقه على توزيعات للشحنة ذات تماثل بسيط .

9 أن تحسب شدة المجال الكهربى عند أية نقطة نتيجة لتوزيع كروى أو خطى أو استوائى للشحنة .

10 أن تحدد ما يأتى تحت ظروف كهروستاتيكية : (أ) المجال الكهربى داخل معدن (فلز) ، (ب) أصل خطوط المجال الكهربى ، (جـ) نقط انتهاء خطوط المجال ، (د) الزاوية التى تسقط بها خطوط المجال على الأسطح المعدنية .

11 أن تستعمل العلاقة $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ فى مواقف بسيطة .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

كميات الشحنات الكهربية

وحدات SI للشحنة : الكولوم (C)

شحنة البروتون (e) : $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C

شحنة الإلكترون $(-e)$: -1.6×10^{-19} C

ثابت قوة كولوم (k)

$$k = 8.99 \times 10^{9}\ \text{N.m}^2/\text{C}^2$$

سماحية الفراغ ϵ_0

$$\epsilon_0 = \frac{k}{4\pi} = 8.85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2/\text{N.m}^2$$

وحدات المجال الكهربى

$$E = \frac{F}{q} = \text{N/C.}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

مفاهيم الشحنة الكهربية

1 يوجد نوعان من الشحنة الكهربية ، موجب (+) وسالب (-) .

2 تحتوى الذرات على جسيمات أساسية مشحونة . البروتون يحمل كمية محددة من الشحنة الموجبة والإلكترون يحمل كمية محددة من الشحنة السالبة .

3 القوة بين الشحنات ذات الإشارة الواحدة تنافرية ، والقوى بين الشحنات ذات الإشارة المختلفة تجاذبية .

بقاء الشحنة

لا يمكن خلق أو تدمير شحنة موجبة أو سالبة صافية فى أية عملية فيزيائية .

قانون كولوم

يعطى مقدار القوة الكهربية بين شحنتين نقطيتين q_1 و q_2 تفصلهما مسافة r بالعلاقة

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

حيث k ثابت فيزيائى كونى يعرف بثابت قوة كولوم .

خلاصة :

1 تكون القوة الكهربية تجاذبية لو كان للشحنات إشارات متضادة ، وتنافرية لو كان للشحنات نفس الإشارة .

2 لو كان للشحنات تماثل كروى فإن المسافة r هى التى بين مراكزها .

المجال الكهربى (E)

يعرف المجال الكهربى فى نقطة ما من الفضاء بأنه النسبة بين القوة الكهربية المؤثرة على شحنة اختبار صغيرة q_t موضوعة فى تلك النقطة ومقدار تلك الشحنة :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}\,(\text{المؤثرة على } q_t)}{q_t}$$

خلاصة :

1 يكون اتجاه $\mathbf{E}$ هو نفس اتجاه القوة $\mathbf{F}$ المؤثرة على شحنة موجبة .

2 وحدات SI للمجال E هو N/C .

3 من نتائج تعريف $\mathbf{E}$ أن القوة المؤثرة على شحنة q ، موضوعة فى نقطة بها مجال كهربى $\mathbf{E}$ هى :

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

المجال الكهربى لشحنة نقطية

مقدار المجال الكهربى لشحنة نقطية Q عند مسافة r من Q هو

$$E = \frac{kQ}{r^2}$$

خلاصة :

1 يكون اتجاه المجال الكهربى قطريًا إلى الخارج من شحنة موجبة وقطريًا إلى الداخل نحو شحنة سالبة .

2 يمكن حساب المجال الكهربى لعدد من الشحنات النقطية ـ من حيث المبدأ ـ فى أية نقطة بتطبيق مبدأ التراكب ، أى بحساب المجال الناشئ عن كل شحنة نقطية على حدة ثم جمع الإسهامات المنفردة **متجهيًا** .

3 داخل خريطة للمجال الكهربى تكون شدة المجال الكهربى أكبر ما يمكن حيث تكون الخطوط أكثف ما يمكن وأقل ما يمكن عندما تكون الخطوط أبعد ما تكون عن بعضها البعض .

التدفق (الفيض) الكهربى

التدفق الكهربى خلال عنصر صغير للمساحة ΔA هو :

$$\text{التدفق الكهربى} = (E\cos\theta)\Delta A = E_{\perp}\Delta A$$

حيث : شدة المجال الكهربى المار خلال ΔA = E ، الزاوية المحصورة بين $\mathbf{E}$ والعمودى على ΔA ، $\mathbf{n}$ = θ .

قانون جاوس

يكون مجموع إسهامات التدفق $E_{\perp}\Delta A$ فوق سطح مغلق بأكمله ـ يسمى سطحًا جاوسيًا ـ مساويًا للشحنة الكلية المحاطة بذلك السطح مقسومة على ϵ_0 . وقانون جاوس مفيد بشكل خاص للحالات التى يكون لتوزيع الشحنات فيها تماثل بسيط .

المجالات الكهربية ذات التماثل البسيط

شحنة كروية منتظمة Q (نصف قطرها R)

$$E = \frac{kQ}{r^2} \qquad r > R$$

قشرة كروية ذات شحنة مقدارها Q (ونصف قطرها R)

$$E = \begin{cases} 0 & r > R \\ \dfrac{kQ}{r^2} & r \geqslant R \end{cases}$$

شحنة خطية منتظمة

حيث λ = الشحنة لوحدة الأطوال (C/m) $E = \dfrac{2k\lambda}{r}$

صفيحة مستوية منتظمة الشحنة

حيث σ = الشحنة لوحدة المساحات (C/m^2) $E = \dfrac{\sigma}{2\epsilon_0}$

الحيز بين لوحين مستويين متوازيين $E = \dfrac{\sigma}{\epsilon_0}$

واللوحان هنا يحملان كثافتي شحنة σ متساويتين ومتضادتين في الإشارة .

الموصلات في مجال كهربي

في ظروف كهروستاتيكية فإنه :

1 لا يمكن للمجال الكهربي أن يتواجد داخل مادة موصلة .

2 لابد أن تكون خطوط المجال الكهربي الخارجي متعامدة في كل نقطة مع سطح الموصل .

أسئلة وتخمينات

1 علقت كرة مشحونة صغيرة بخيط . كيف تحكم على ما إذا كانت الشحنة على الكرة موجبة أو سالبة ؟

2 تستطيع أن تضع شحنة استاتيكية (ساكنة) على أية قطعة جافة من البلاستيك إذا دلكتها بقطعة من النسيج أو الفراء أو أكياس التغليف البلاستيكية . كيف تستطيع تحديد إشارة الشحنة الموضوعة على البلاستيك ؟

3 الكهربية الأستاتيكية تحدث شرارة قد تسبب انفجار بعض الغازات الطيارة ، مما كان يمثل خطرًا حقيقيًا في غرف العمليات بالمستشفيات لأن المخدر الذي كان يستعمل عندئذ كان قابلاً للاحتراق . ما هي الإجراءات التي يمكن اتخاذها للحد من هذا الخطر ؟

4 تبلغ الشدة الكهربية للهواء نحو 3×10^6 N/C . أي أن شرارة سوف تقفز خلال الهواء إذا زادت شدة المجال الكهربي عن هذه القيمة . لماذا تقفز الشرارة بشكل أفضل عند الأطراف والحواف الحادة ؟ عندما يصبح جسدك مشحونًا بشدة عند سيرك فوق سجادة عميقة الوبر في جو جاف ، لماذا تقفز شرارة من أظافر يدك إلى أي جسم معدني تلمسه مثل الموقد أو مقبض الباب ؟

5 تلتصق الملابس دائمًا عند إخراجها من المجفف . لماذا ؟ وما هو المتبع عادة لإزالة هذا التأثير ؟

6 لا تحاول أبدًا مسح الأتربة من سطح أسطوانة فونوغراف بقطعة قماش قطنية أو صوفية عادية . لماذا ؟

7 في الأجواء الجافة كثيرًا ما يرى الإنسان (أو يسمع) شرارات تقفز عند تمشيط الشعر أو خلع الملابس في الظلام . لماذا ؟

8 شحنتان نقطيتان موجبتان لهما نفس القدار تفصلهما مسافة D . أين يمكنك وضع شحنة ثالثة بحيث تكون محصلة القوة المؤثرة عليها صفرًا ؟ وهل تكون الشحنة عندئذ في وضع اتزان مستقر ؟

9 شحنة نقطية موجبة وشحنة نقطية سالبة أكبر منها بكثير وتفصلهما مسافة D . هل هناك موضع يمكن أن توضع فيه شحنة نقطية ثالثة بحيث تكون محصلة القوة المؤثرة عليها صفرًا ؟

10 علقت كرة ضئيلة ذات شحنة q بين لوحين معدنيين متوازيين وكبيرين ومتصلين بالأرض . ارسم تخطيطيًا المجال الكهربى بين اللوحين . ما الذى تستنتجه فيما يخص الشحنات المستحثة على اللوحين ؟

11 إن خطوط المجال الكهربى المرسومة بشكل صحيح لن تتقاطع مطلقًا . لماذا ؟

12 تتم عادة حماية الأجهزة الحساسة ضد المجالات الكهربية غير المرغوب فيها وذلك بوضعها داخل علب معدنية أو داخل شبكة من الأسلاك الدقيقة المتصلة بالأرض . اشرح السبب فى أن مجال شحنة موضوعة خارج مثل هذه الدروع لا تؤثر فى المنطقة الداخلية .

مسائل

الأقسام من 1-16 إلى 8-16

1 احسب الشحنة الصافية على عينة من مادة مؤلفة من (أ) 8×10^{15} إلكترونًا و (ب) مجموعة من 8×10^{15} إلكترونًا و 6×10^{14} بروتونًا .

2 شحنتان نقطيتان $q_1 = -4.0\ \mu C$ و $q_2 = +3.0\ \mu C$ وتفصلهما مسافة 100 cm . أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية على كل منهما .

3 قرب بروتونان من بعضهما إلى مسافة 3.5×10^{-14} m . (أ) أوجد القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على كل منهما . (ب) ما هى النسبة بين مقدار هذه القوة ووزن البروتون فوق الكرة الأرضية ؟ يمكنك اعتبار البروتون شحنة نقطية كتلتها 1.67×10^{-27} kg .

4 كم يمكن أن تبلغ كتلة البروتون لو أن مقدارى القوى الجاذبية والكهروستاتيكية كانا متساويين بين زوج من البروتونات ؟

5 وضعت شحنتان نقطيتان على محور x بحيث : أن الشحنة $+6.0\ \mu C$ عند $x = 0$ والشحنة $+8.0\ \mu C$ عند $x = +30$ cm . أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنة $+6.0\ \mu C$.

6 وضعت شحنة نقطية مقدارها $+2.0\ \mu C$ على محور x عند $x = 25$ cm وشحنة مجهولة q عند $x = 65$ cm على نفس المحور ، وكانت القوة المؤثرة على الشحنة $2.0\ \mu C$ هى 1.2 N فى الاتجاه الموجب لمحور x . ما هو مقدار وإشارة الشحنة q ؟

■ 7 شحنتان نقطيتان q_1 و q_2 موضوعتان على بعد 60 cm من بعضهما البعض ، وتتنافران بقوة مقدارها 0.3 N . والمجموع الجبرى للشحنتين هو $+7.2\ \mu C$. أوجد كلا من q_1 و q_2 .

■ 8 كرر المسألة السابقة لو أن الشحنتين تتجاذبان بقوة مقدارها 0.3 N .

9 تتنافر شحنتان نقطيتان متساويتان فى المقدار بقوة مقدارها 2.4 N عندما تفصل بينهما مسافة 6.0 cm . أوجد مقدار كل منهما .

■ 10 كرتان متشابهتان كتلة كل منهما 240 g وقطر كل منهما 2.0 cm تفصلهما مسافة 6.0 cm (بين مركزيهما) . وتحمل كل منهما شحنة منتظمة مقدارها $70\ \mu C$. وقد أطلقت إحدى الكرتين . أوجد العجلة التى تتحرك بها الكرة . يمكنك إهمال الجاذبية .

■ 11 كرتان متماثلتان على هيئة نقطية وكتلة كل منهما 60 g وتفصل بينهما مسافة 240 cm ، وتحملان شحنات متشابهة q من حيث المقدار ومختلفة فى الإشارة . ما مقدار الشحنة q التى من شأنها جعل قوى التجاذب الكهروستاتيكية والتجاذب التثاقلى متساوية ؟

12 وضعت الشحنات النقطية الثلاث التالية على المحور x : $+5.0\ \mu C$ عند $x = 0$ ، $+4.0\ \mu C$ عند $x = -40$ cm و $+6.0\ \mu C$ عند 80 cm . أوجد القوة المؤثرة على (أ) الشحنة $6.0\ \mu C$ ، (ب) الشحنة $4.0\ \mu C$.

13 وضعت الشحنات النقطية الثلاث $-6\ \mu C$ و $+5\ \mu C$ و $-5\ \mu C$ عند $x = 0$ ، $x = -60$ ، $x = +60$ cm على الترتيب . أوجد القوة المؤثرة على (أ) الشحنة $-6\ \mu C$ و (ب) الشحنة $+5\ \mu C$.

14 شحنة مقدارها $6\,\mu C$ تفصلهما عن شحنة مقدارها $-3\,\mu C$ مسافة $60\ cm$. أوجد الوضع الذى يجب أن توضع فيه شحنة ثالثة $12\,\mu C$ بحيث تكون القوة الكهروستاتيكية الصافية المؤثرة عليها صفرًا .

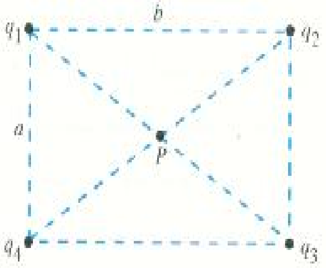
15 وضعت شحنتان نقطيتان على المحور x بحيث : الشحنة $-5 \times 10^{-9}\ C$ عند $x = 0$ ، والشحنة $+6 \times 10^{-9}\ C$ عند $x = 100\ cm$. عند أى موقع (مواقع) بالقرب من هذه الشحنات يمكن وضع شحنة $+4 \times 10^{-9}\ C$ بحيث لا تقع تحت تأثير أية قوة صافية ؟

16 وضعت شحنتان نقطيتان $+5\,\mu C$ و $+7\,\mu C$ على المحور x عند $x = 0$ و $x = 120\ cm$ على الترتيب . عند أى موقع (مواقع) بالقرب من هذه الشحنات تكون القوة الكهروستاتيكية الصافية على الشحنة $-8\mu C$ صفرًا ؟

17 وضعت ثلاث شحنات نقطية متماثلة مقدار كل منها $+6\,\mu C$ عند الأركان الثلاثة لمربع طول ضلعه $8\ cm$. ما هى محصلة القوة الكهروستاتيكية التى تؤثر على شحنة مقدارها $+5\,\mu C$ موضوعة عن الركن الرابع للمربع ؟

18 وضعت ثلاث شحنات نقطية هى $+5.0$ ، $+6.0$ ، $+4.0\ \mu C$ عند ثلاثة أركان لمربع طول ضلعه $8\ cm$. أوجد القوة الكهروستاتيكية الصافية المؤثرة على شحنة مقدارها $-8.0\,\mu C$ موضوعة عند الركن الرابع للمربع بحيث تواجه الشحنة $+6\,\mu C$ قطريًا .

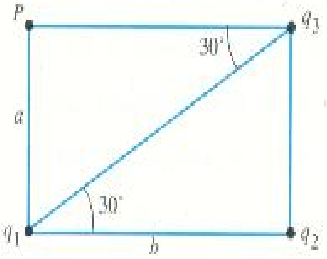
19 وضعت ثلاث شحنات متساوية مقدار كل منها $+5\,\mu C$ عند الأركان الثلاثة لمثلث متساوى الأضلاع ، وطول كل ضلع منه $10.0\ cm$. أوجد القوة الكهروستاتيكية الصافية المؤثرة على كل شحنة .



شكل م 1–16

20 الشحنات النقطية الأربع المبينة فى الشكل م 1–16 قيمة كل منهما $4.0\ \mu C$. أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على q_2 من جانب الشحنات الثلاث الأخرى ($a = 40\ cm$ و $b = 60\ cm$) .

21 فى الشكل م 1–16 كانت $q_1 = q_3 = +5\,\mu C$ وكانت $q_2 = q_4 = -6.0\,\mu C$. أوجد مقدار واتجاه محصلة القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على q_1 . اعتبر أن $a = 40\ cm$ و $b = 60\ cm$.



شكل م 2–16

22 كل من الشحنات النقطية الثلاث فى الشكل م 2–16 هى $+6.0\ \mu\ C$. أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على q_3 من جانب الشحنتين الأخريين . اعتبر أن $a = 40\ cm$.

23 فى الشكل م 2–16 كانت $q_1 = q_3 = +5.0\,\mu C$ و $q_2 = -7.0\ \mu C$. أوجد مقدار واتجاه القوة المؤثرة على q_1 . اعتبر $a = 3.0\ m$.



شكل م 3–16

24 علقت كرتان من نفس النقطة كما هو موضح فى الشكل م 3–16 . وكانت كتلة كل منهما $1.0\ g$ وتحمل شحنة q . وكان طول الخيط $40\ cm$. وتتزن الكرتان عند $\theta = 30°$. أوجد الشحنة q على كل كرة .

25 كرر المسألة السابقة لو أن الكرتين كانتا تحملان شحنات غير متساوية ، بحيث كانت الكرة التى إلى اليسار تحمل نصف ما تحمله اليمنى من شحنة .

26 تتأثر شحنتان كرويتان صغيرتان بقوة كهروستاتيكية عندما تفصلهما مسافة R . فإذا ضوعفت الشحنة على أحداهما وضوعفت ثلاث مرات على الثانية ثم خفضت المسافة بينهما إلى النصف ، فما هى النسبة بين القوة الكهروستاتيكية الجديدة إلى القوة التى كانت بينهما أصلاً ؟

الأقسام من 16-9 إلى 16-11

27 أوجد مقدار واتجاه المجال الكهربى عند مسافة قدرها 1.0 m من إلكترون . أعد المسألة بالنسبة لبروتون .

28 أوجد شدة المجال الكهربى الناشئ عن شحنة نقطية $q = -6.0\,\mu C$ عند نقطة تبعد 90 cm عن الشحنة . هل يتجه المجال قطريًا إلى الخارج أم إلى الداخل ؟

29 وضعت شحنتان على المحور x : الشحنة $+5.0\,\mu C$ عند $x = 90$ cm والشحنة $-4.0\,\mu C$ عند $x = 0$. أوجد المجال **E** عند (أ) $x = 40$ cm و (ب) $x = -60$ cm .

30 (أ) أوجد المجال الكهربى عند نقطة تقع عند منتصف المسافة بين شحنتين هما $3.0\,\mu C$ و $6.0\,\mu C$ تفصلهما مسافة 60 cm . (ب) أعد المسألة عندما تكون الشحنة الثانية $-5.0\,\mu C$.

■ 31 أوجد المجال الكهربى **E** عند مركز المستطيل فى الشكل م 16-1 لو أن : (أ) $q_1 = q_2 = q_3 = q_4$ و (ب) $q_1 = q_2 = -3.0\,\mu C$ و $q_3 = q_4 = 4.0\,\mu C$. اعتبر أن $a = 40$ cm و $b = 60$ cm .

■ 32 وضعت شحنتان $6.0\,\mu C$ و $-6.0\,\mu C$ عند رأسى مثلث متساوى الأضلاع . وطول ضلعه 10.0 cm . ما هو مقدار واتجاه المجال الكهربى عند الرأس الثالث للمثلث ؟

33 فى الشكل م 16-2 كانت $q_1 = q_3 = -5.0\,\mu C$ و $q_2 = 3.0\,\mu C$. أوجد المجال الكهربى **E** فى النقطة P . اعتبر $a = 40$ cm .

■ 34 وضعت شحنتان $3.0\,\mu C$. $-5.0\,\mu C$ على المحور x عند $x = 0$ و $x = 40$ cm على الترتيب . أين - على المحور x لو كان ممكنًا - يكون المجال الكهربى **E** صفرًا ؟

■ 35 تتأثر كرة صغيرة تحمل شحنة مقدارها -4.0×10^{-13} C بقوة نحو الشرق مقدارها 1.0×10^{-9} N بسبب شحنتها عندما تعلق من نقطة معينة فى الفضاء . ما هو مقدار واتجاه المجال الكهربى **E** فى تلك النقطة ؟

■ 36 يتجه المجال الكهربى فى منطقة معينة نحو الشرق وشدته 3600 N/C . أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية التى تتأثر بها شحنة مقدارها $-6.0\,\mu C$ موضوعة فى هذه المنطقة .

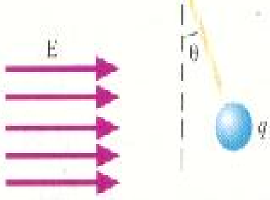
■ 37 انطلق إلكترون فى منطقة يمتد المجال الكهربى بها فى اتجاه المحور x الموجب وشدته 3600 N/C . أوجد مقدار واتجاه عجلة (تسارع) الإلكترون . (كتلة الإلكترون $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg) .

■ 38 تحمل قطرة صغيرة من الزيت كتلتها m شحنة $+q$. وعندما علقت فى مجال كهربى منتظم يتجه رأسيًا فإن القطرة أصبحت (طافية) فى الفضاء الحر . عبّر عن مقدار المجال الكهربى **E** بدلالة الشحنة q والكتلة m للقطرة .

■ 39 ثبتت كرة صغيرة كتلتها 0.05 g فى الفضاء ضد الجاذبية الأرضية عندما كان المجال الكهربى المنتظم المؤثر عليها مقداره 600 N/C ويتجه رأسيًا إلى أسفل . أوجد الشحنة التى على الكرة .

■ 40 علقت كرة كتلتها 0.450 g بخيط فى مجال كهربى مقداره 6000 N/C ويتجه رأسيًا إلى أعلى . وكان الشد فى الخيط يساوى 3.0×10^{-3} N . أوجد شحنة الكرة .

■ 41 فى الشكل م 16-4 علقت كرة كتلتها m وشحنتها q بخيط فى مجال كهربى **E** . وكانت الكرة معلقة بحيث يصنع الخيط زاوية مقدارها θ مع الخط الرأسى . أوجد **E** بدلالة m ، q ، θ .



شكل م 16-4

■ 42 لو كانت كتلة الكرة فى المسألة السابقة هى 0.500 g وكان الخيط يصنع زاوية مقدارها 15° مع الرأسى عندما تعلق فى مجال كهربى شدته 500 N/C . ما هى الشحنة q التى على الكرة ؟

مسائل إضافية

43 وضعت شحنتان نقطيتان على المحور x : شحنة $+6\,\mu C$ عند $x = 0$ وشحنة $+8\,\mu C$ عند مسافة $100\ cm$ أين على المحور x بين هاتين الشحنتين لابد من وضع شحنة ثالثة حتى تكون القوة الكهروستاتيكية الصافية المؤثرة على الشحنات الثلاث كلها صفرًا ؟ أوجد مقدار الشحنة الثالثة.

44 وضعت شحنة مقدارها $-5.0\,\mu C$ عند نقطة أصل المحور x . ووضعت شحنتان أخريان على المحور x : q_1 عند $x = 40\ cm$ و q_2 عند $x = 50\ cm$, . أوجد مقدار وإشارة كل من q_1 و q_2 إذا كانت القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنات الثلاث كلها صفرًا .

45 تؤثر شحنتان نقطيتان q_1 و q_2 تفصلهما مسافة $1.0\ m$ بقوة مقدارها $0.090\ N$ على إحداهما الأخرى . والمجموع الجبرى للشحنتين $q_1 + q_2 = 70\,\mu C$. أوجد مقدار كل من q_1 و q_2 . هل القوة تنافرية أم تجاذبية ؟

46 يحتوى الشخص متوسط الحجم على نحو 3×10^{28} بروتونًا وعددٍ مماثل من الإلكترونات . افترض أن هناك شخصين تفصلهما مسافة قدرها $40\ m$ ، وأن 0.2 فى المائة من إلكترونات أحد الشخصين قد انتقلت إلى الشخص الآخر . ما هو مقدار القوة اللازمة للاحتفاظ بالشخصين على نفس البعد ؟

47 كرتان موصلتان صغيرتان ومتماثلتان تحملان الشحنتين $q_1 = 9.0\,\mu C$ و $q_2 = 5.0\,\mu C$. والمسافة بين مركزيهما هى $0.5\ m$. (أ) أوجد القوة الكهروستاتيكية بينهما . (ب) تلامست الكرتان ثم انفصلتا ثانية إلى نفس المسافة السابقة . ما هى القوة الكهروستاتيكية بينهما بعد حدوث الاتزان ؟

48 فى نموذج بوهر لذرة الهيدروجين يدور إلكترون حول بروتون ساكن فى مدار نصف قطره $0.53 \times 10^{-10}\ m$. (أ) ما مقدار القوة الكهروستاتيكية التى يؤثر بها البروتون على الإلكترون الذى يدور حوله ؟ (ب) لو كانت هذه القوة ستعتبر قوة جذب مركزية لتحتفظ بالإلكترون فى مدار دائرى . فكم ستكون سرعة الإلكترون ؟ (كتلة الإلكترون $m_e = 9.1 \times 10^{-31}\ kg$) .

49 فى المسألة السابقة ، أوجد مقدار واتجاه المجال الكهربى الناشئ عن البروتون عند موقع الإلكترون .

50 يعتبر نوى الراديوم مشعًا ويبعث بجسيمات ألفا ($q_\alpha = +2e$ ، $m_\alpha = 4 \times 1.66 \times 10^{-27}\ kg$) والنواة التى ينبعث منها جسيم ألفا ستكون شحنتها $+86e$ وكتلتها كبيرة جدًا . أوجد : (أ) القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على جسيم ألفا من جانب النواة عندما تكون المسافة بينهما $6 \times 10^{-14}\ m$ و (ب) تسارع (عجلة) جسيم ألفا فى تلك اللحظة .

51 تحمل قشرة كروية رقيقة عازلة نصف قطرها R شحنة مقدارها Q موزعة بانتظام على سطح القشرة . ما هو المجال الكهربى $\mathbf{E}$. عند مركز القشرة ؟

52 تحمل كرة معدنية معزولة ومجوفة نصف قطرها $40\ cm$ شحنة مقدارها $-10.0\,\mu C$. ما هو مقدار المجال الكهربى $\mathbf{E}$ (أ) فى الفضاء الفارغ داخل الكرة و (ب) على بعد $60\ cm$ من مركز الكرة ؟

53 تم إبطاء سرعة بروتون يتحرك على امتداد المحور x بواسطة مجال كهربى $\mathbf{E}$. وعند $x = 0$ كانت سرعة البروتون $3.5 \times 10^6\ m/s$ وعند $x = 7.0\ cm$ توقف البروتون تمامًا . أوجد مقدار واتجاه المجال $\mathbf{E}$. (كتلة البروتون $m_p = 1.67 \times 10^{-27}\ kg$) .

54 فى لحظة ما ، كان إلكترون يتحرك منطلقًا من نقطة الأصل بامتداد المحور x وبسرعة تبلغ $6.0 \times 10^6\ m/s$. ويتسبب مجال كهربى منتظم $\mathbf{E}$ مواز للمحور فى إبطاء حركة الإلكترون ، ثم توقفه ، ثم تحركه فى الاتجاه المعاكس حتى يصل فى النهاية إلى نقطة الأصل بعد زمن قدره $40.0\,\mu s$. أوجد مقدار واتجاه المجال الكهربى $\mathbf{E}$. (كتلة الإلكترون $m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ kg$) .

■■ 55 قذف إلكترون من نقطة أصل الإحداثيات باتجاه المحور x الموجب بسرعة v_{x0} . وهناك مجال كهربى $\mathbf{E}$ يتجه بامتداد المحور y في هذه المنطقة . (أ) إثبت أن الإحداثى y للإلكترون بعد فترة زمنية t هو $y = -eEt^2/2me$) حيث e هى شحنة الإلكترون و E مقدار المجال الكهربى . (ب) إثبت أن مسار الإلكترون فى المستوى xy يعطى بالمعادلة . $(y = eE / 2m_e v_{x0}^2)(x^2)$

■■ 56 وضعت شحنتان لهما نفس المقدار $0.5\ \mu C$ وإشارات متضادة على المحور x ، ثم وصلتا معًا بواسطة قضيب (متعادل كهربيًا) ولا كتلة له ، وطوله 5.4×10^{-8} m . ثم طبق مجال كهربى منتظم شدته 400 N/C على امتداد المحور y . (أ) أوجد عزم الدوران الصافي المؤثر على الشحنتين . (ب) ما هو عزم الدوران لو كان المجال الكهربى متجهًا بزاوية مقدارها $60°$ مع المحور x ؟

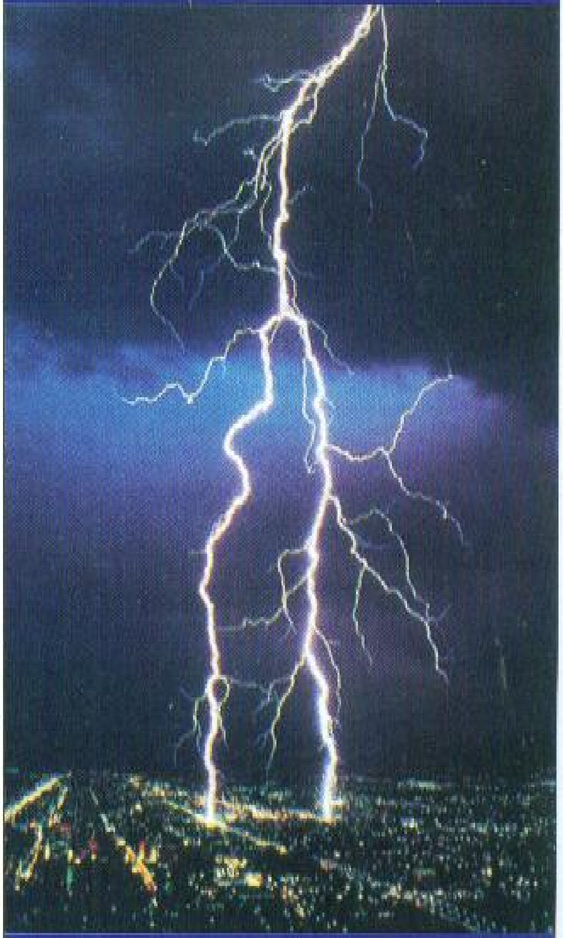
■■ 57 يحمل كل إلكترون في شعاع للجسيمات طاقة حركة مقدارها 1.2×10^{-16} J . ما هو مقدار المجال الكهربى اللازم لإيقاف الإلكترونات فى الشعاع فى مسافة طولها 15 cm ؟ وما هو اتجاه ذلك المجال ؟ (كتلة الإلكترون $me = 9.1 \times 10^{-31}$ kg) .

■■ 58 وضعت شحنتان متساويتان في المقدار وبإشارتين متعاكستين على امتداد المحور x عند $x = b$ و $x = -b$. إثبت أن المجال الكهربى الناشئ عن هاتين الشحنتين عند نقطة على المحور y سيكون في اتجاه موازٍ لمحور x ومقدارها يعطى بالعلاقة . $E = 2kqb / (y^2 + b^2)^{3/2}$

■■ 59 لو أن الشحنتين في المسالة السابقة كان لهما نفس الإشارة فماذا قد يكون اتجاه ومقدار المجال الكهربى ؟

■■ 60 وضعت شحنتان نقطيتان q و $-q$ على المحور x بحيث كانتا قريبتين جدًا من بعضهما وعند مسافة صغيرة جدا b على جانبه نقطة أصل الإحداثيات . إثبت أن مقدار المجال الكهربى عند نقطة بعيدة على امتداد المحور x تعطى بالمعادلة . $E = 4kqb / x^3$

الفصل السابع عشر



الجهد الكهربى

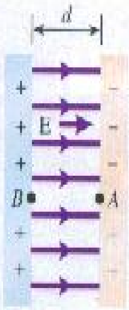
لقد وجدنا عند دراسة الميكانيكا أن مفهوم الكميات القياسية كالشغل والطاقة ذو فائدة عظيمة لأن كثيرًا من المواقف التى تظهر أثناء الدراسة ، تكون أعقد من أن تحل بالتفصيل باستخدام متجهات القوة . ويعتبر إدخال مفهوم الطاقات « القياسية » مما يتيح لنا غالبًا أن نحصل على نتائج نافعة بشكل سريع وبسيط . وسنرى فى هذا الفصل أن مفهوم طاقة الوضع الكهربية مفيد للغاية فى كثير من التطبيقات الكهربية . بل إنه لا غنى عنه لفهم موضوعات متنوعة مثل الدوائر الكهربائية ومعجلات الجسيمات الأولية .

17-1 طاقة الوضع الكهربية

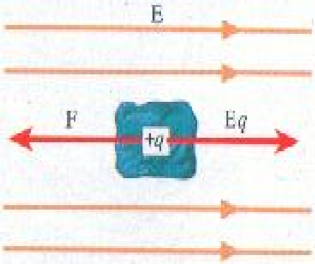
تذكر عند مناقشة حركة جسم من مكان إلى آخر فى مجال للجاذبية (تثاقلى) أننا استعملنا مفهوم طاقة الوضع التثاقلية (GPE) . فلكى نرفع جسمًا كتلته m بدلاً من استعمال قوة تتجه إلى أعلى مقدارها mg حتى تتوازن مع شد الجاذبية للجسم إلى أسفل . والشغل المبذول لرفع الجسم لمسافة مقدارها h هو عبارة عن حاصل ضرب القوة فى المسافة أو mgh . وهنا نقول أن هذا الشغل قد أدى إلى زيادة طاقة الوقع التثاقلية للجسم . فإذا ترك الجسم بعد ذلك ليسقط بحرية من نفس الارتفاع h فإنه سيكتسب طاقة حركة ، ومن قانون بقاء الطاقة نستطيع كتابة (GPE) طاقة الوضع التثاقلية عند ارتفاع مقداره h = (KE) طاقة الحركة المكتسبة خلال المسافة h .

وقد جنينا فائدة ضخمة من طاقة الوضع التثاقلية وتحويلها المتبادل مع طاقة الحركة أثناء دراستنا للميكانيكا .

وهناك موقف مماثل لهذا فى الكهربية ؛ لأن الأجسام المشحونة عادة ما يكون لديها طاقة وضع كهربية يمكن تحويلها إلى طاقة حركة ، ولإيضاح ذلك لنعتبر حالة جسم مشحون موجود بين لوحين متوازيين ومشحونين (وسوف نهمل قوى الجاذبية فى هذه المناقشة لأنها مهملة القيمة مقارنة بالقوى الكهربية التى نحن بصددها) . ويوضح الشكل 17-1 المجال الكهربى فى المنطقة الوسطى بين اللوحين ؛ حيث تكون له قيمة ثابتة **E** ويتجه كما فى الشكل . أما الشكل 17-2 فيبين القوى المؤثرة على جسم موجب الشحنة موجود بين اللوحين والجسم المشحون بشحنة q سيتأثر بقوة مقدارها $\mathbf{E}q$ بسبب وجود المجال الكهربى ويكون اتجاه هذه القوة نحو اليمين . وإذا أردنا أن نمسك بالجسم المشحون فى مكانه فلا يتحرك فلابد أن نؤثر عليه بقوة مقدارها $\mathbf{F} = -\mathbf{E}q$.



شكل 17-1:
يكون المجال الكهربى بين لوحين متوازيين مشحونين بشحنات متضادة منتظمًا .



شكل 17-2:
تلزم قوة هى $\mathbf{F} = -\mathbf{E}q$ لو كان على الجسم الذى شحنته q أن يظل معلقًا بين اللوحين المرسومين فى الشكل 17-1 .

لنفترض أن الجسم المشحون (وهو أصغر بكثير مما هو مبين بالشكل) موجود أصلاً فى النقطة A فى الشكل 17-1 . فلو أردنا تحريكه إلى النقطة B للزم أن نجذبه فى المسافة كلها بقوة مقدارها **F** . أى أننا سنبذل شغلاً على الجسم عند جذبنا له من A إلى B . وحيث أن **E** ثابت فى هذا الموقف فإن الشغل الذى تبذله القوة **F** للانتقال من A إلى B هو :

$$W_{AB} = Fd = qEd \qquad (\text{ثابت } \mathbf{E})$$

وهذا الشغل مشابه تمامًا للشغل المبذول فى رفع جسم ضد قوة الجاذبية الثابتة . ولهذا نقول أن الشغل المبذول فى جذب الشحنة ضد القوة الكهربية يزيد من طاقة الوضع الكهربية للشحنة . وعلينا تذكر أنه فى كلتا الحالتين ـ التثاقلية والكهربية ـ فإن الفرق فى طاقة الجهد فقط هو المهم فيزيائيًا .

وبعد أن نصل بالجسم إلى النقط B يمكننا أن نطلقه ونستعيد طاقة وضعه على هيئة طاقة حركة . فالجسم المشحون وهو عند B سيجذب نحو النقطة A بالقوة $\mathbf{E}q$ (التى أصبحت الآن غير متوازنة) والتى تؤثر عليه وهكذا فعندما يطلق الجسم عند B فإنه يتسارع نحو A ، وهكذا نعرِّف طاقة الوضع الكهربية (EPE) لشحنة عند B بالنسبة لنقطة أخرى A إن طاقة الوضع الكهربية لشحنة عند النقطة B بالنسبة للنقطة A تساوى الشغل المبذول ضد القوى الكهربية لتحريك الشحنة من A إلى B .

$$W_{AB} = \Delta \text{EPE} = \text{EPE}_B - \text{EPE}_A$$

ويكمن الفرق الأساسى عند مقارنة طاقة الوضع الكهربية مع طاقة الوضع التثاقلية فى حقيقة أن هناك نوعين من الشحنة . ولننظر الآن ماذا يمكن أن يحدث لو أن الشحنة الموجودة بين اللوحين كانت سالبة . إن القوة المؤثرة على الشحنة $-q$ ستتجه الآن فى عكس اتجاه المجال **E** ، وعلى هذا فالقوة المؤثرة لابد وأن تبذل شغلاً موجبًا على $-q$ حتى تحركها من B إلى A ؛ أى أن الشحنة $-q$ كانت ستحوز على طاقة وضع كهربية أكبر عند A عما إذا كانت عند B . وإذا سمح لها أن تتحرك بحرية « لسقطت » من A نحو B فى اتجاه عكس اتجاه **E** .

17-2 فرق الجهد

وفيما يخص الكهربية سوف نخطو خطوة أبعد مما فعلنا في الميكانيكا وذلك بتعريف كمية قياسية أخرى سنطلق عليه **الجهد الكهربى** . ولكى نوضح هذا المفهوم سنعود إلى حالة الشحنة الموجبة التى تتحرك بين اللوحين المشحونين في الشكل 1-17 . لقد كان الفرق في **طاقة** الوضع لتلك الشحنة بين النقطتين A و B هو

$$\mathrm{PE}_B - \mathrm{PE}_A = qEd$$

دعنا الآن نقسم هذه المعادلة على q ، لنحصل بذلك على الفرق بدلالة كمية جديدة لا تعتمد سوى على E والمسافة بين A و B :

$$\frac{\mathrm{PE}_B - \mathrm{PE}_A}{q} = V_B - V_A \qquad (17\text{-}1)$$

وهذه الكمية الجديدة ، PE/q تسمى الجهد الكهربى ويرمز لها بالرمز V . وللجهد الكهربى وحدات جول لكل كولوم أو ما سنسميه **فولت** . ويلاحظ أنه خلافاً لطاقة الوضع PE ، فإن الجهد الكهربى لا يعتمد على الشحنة النوعية q التى يؤثر عليها المجال ؛ كما يلاحظ أيضًا أن تعريف الفولت يفتح الباب أمام تفسير بديل لوحدات المجال الكهربى E .

وهكذا فإنه بالإضافة إلى قياس المجال كقوة لوحدة الشحنات (N/C) فإنه يعتبر قياسًا لدى السرعة التى يتغير بها الجهد الكهربى مع الموضع (لكل متر من المسافة) . والجهد يتضاءل في اتجاه المجال الكهربى . أما فرق الجهد بين A و B فيشار إليه أيضًا **كفرق الفولطية** أو مجرد **الفولطية** أحيانًا ، وهى في هذه الحالة :

$$V_{AB} = V_B - V_A = Ed \quad (\text{المجال } \mathbf{E} \text{ ثابت}) \qquad (17\text{-}2)$$

دعنا الآن نعيد صياغة تعريف فرق الجهد :

فرق الجهد (أو الفولطية) بين النقطتين A و B هو الفرق في طاقة الوضع لشحنة موجبة بين نقطتين ، مقسومًا على الشحنة .

من المهم عند هذا الحد ملاحظة (وتذكر) ما يلى :

1 أن المعادلة 2-17 تنطبق فقط على حالة مجال ثابت كذلك الذى ينشؤه لوحان متوازيان مشحونان .

2 يُعرَّف الجهد الكهربى بدلالة طاقة الوضع الكهربية (EPE) لشحنة **موجبة** بمعنى أنه عند التحرك من جهد عالٍ إلى آخر مخفض فإن الشحنة الموجبة تفقد EPE أما الشحنة السالبة فتكون EPE لها أقل عند نقطة ذات جهد أعلى ، أى أنها تكتسب EPE عندما تتحرك من الجهد العالى إلى الجهد المنخفض .

وهذه النقطة الأخيرة يمكن تأكيدها إذا استعرنا بعض مصطلحات الجاذبية (التثاقل) . عندما نتحدث عن الجهد الكهربى فإن الشحنة الموجبة الحرة سوف « تسقط » نحو

أسفل هضبة الجهد إلى مناطق ذات جهد أقل ، بينما « ستسقط » الشحنة السالبة نحو أعلى هضبة الجهد . وفى كلتا الحالتين فإن الشحنتين ستخسران PE عندما « تسقطان » .

ولو أننا نعرف الفولطية V_{AB} بين A و B فإننا نستطيع حساب الشغل اللازم لتحريك شحنة من A إلى B . فباستخدام المعادلة (1-17) نجد :

$$\text{الشغل} = \Delta EPE = qV_{AB}$$

وينطبق هذا بنفس الدرجة على كل من الشحنات السالبة والموجبة لو أننا فقط تذكرنا أن نلاحظ إشارة كل من q و V_{AB} . ولكل من الشغل و ΔEPE السالبين نفس التفسير الذى كان لهما فى الميكانيكا .

مثال توضيحى 1-17

افرض أن المجال الكهربى بين اللوحين فى الشكل 1-17 كان 2400 N/C أو (V/m) . فلو أن المسافة بين اللوحين 0.5 cm فما هو فرق الجهد بينهما ؟

استدلال منطقى : المجال الكهربى ذو قيمة ثابتة ولذا فإن ،

$$V_{AB} = Ed = (2400\ \text{V/m})(0.5 \times 10^{-2}\ \text{m}) = 12\ \text{V}$$

أى أن اللوح الموجب B جهده $12\ V$ أعلى من الجهد عند اللوح A . ولو افترضنا أن الجهد عند اللوح A كان $V = 0$ ، فإن الجهد عند أية نقطة بين اللوحين وتبعد مسافة مقدارها x من اللوح A يعطى بالعلاقة :

$$V(\text{عند } x) = Ex$$

مثال 1-17 :

يحمل لوح مستو كثافة سطحية للشحنة مقدارها $-4.0\ \mu\text{C/m}^2$. لو أننا حددنا الجهد الكهربى عند اللوح بالمقدار $V = 0$ فكم يكون الجهد على بعد مقداره 2.0 cm ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يحدد كيفية اعتماد الجهد الكهربى على المسافة ؟

الإجابة : إنه المجال الكهربى . فعندما يكون المجال الكهربى ثابتًا ، فإن $\Delta V = -E\Delta x$ ، لو أن Δx قيست على امتداد اتجاه E .

سؤال : ما هى العلاقة التى تعبر عن المجال الكهربى الناشئ عن صفيحة منفردة ذات شحنة منتظمة ؟

الإجابة : بالنسبة لنقط ليست بعيدة جدًا عن الصفيحة وفى مناطق بعيدة عن الحواف ، فإن المعادلة 8-16 تفيد بأن :

$$E = \sigma/2\epsilon_0$$

وهو مقدار ثابت كما قد لاحظنا بالفعل .

سؤال : ما هو اتجاه المجال .

الإجابة : بما أن الشحنة على الصفيحة سالبة ، لذا فإن المجال يتجه نحو الصفيحة (بمعنى أن شحنة اختبار موجبة سوف تنجذب نحو الصفيحة) . وهكذا فالتحرك بعيدًا عن الصفيحة يعنى التحرك نحو قيم أعلى للجهد الكهربى .

الحل والمناقشة : مقدار المجال الكهربى هو :

$$E = \frac{4.0\times10^{-6}\ \text{C/m}^2}{2(8.85\times10^{-12}\ \text{C}^2/\text{N.m}^2)}$$

$$= 2.26\times10^5\ \text{N/C} = 2.26\times10^5\ \text{V/m}$$

ويكون التغير فى الجهد عند تحركنا لمسافة 2.0 cm بعيدا عن الصفيحة هو

$$\Delta V = V - 0 = -(2.26\times10^5\ \text{V/m})(-0.020\ \text{m}) = +4520\ \text{V}$$

تأكد من فهمك لاستخدام الإشارات هنا . ومن المفيد تذكر أن التحرك إما بعيدًا عن شحنة سالبة أو نحو شحنة موجبة ، يعنى **زيادة** فى الجهد . أما التحرك نحو شحنة سالبة أو بعيدًا عن شحنة موجبة يعنى **انخفاضًا** فى الجهد .

مثال 17-2 :

افترض أن بروتونًا أطلق من السكون عند النقطة B فى الشكل 1-17 وفى نفس الوقت أطلق إلكترونًا من السكون عند النقطة A . أوجد مقدار السرعة التى تصطدم بها كل شحنة مع اللوح المقابل . اعتبر أن $V_{AB} = 54\ \text{V}$ وكتلة البروتون $m_p = 1.67\times10^{-27}\ \text{kg}$ ، وكتلة الإلكترون m_e تساوى $9.1\times10^{-31}\ \text{kg}$ و $e = 1.6\times10^{-19}\ \text{C}$.

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يحدد مقدار السرعة النهائية للجسيم ؟

الإجابة : ينطلق كل جسيم مشحون بقدر معين من طاقة الوضع الكهربية بالنسبة إلى اللوح المقابل . وتتحول هذه الطاقة (EPE) إلى طاقة حركة KE عندما يصل الجسيم إلى اللوح المقابل .

سؤال : ما هو التغير فى (EPE) الذى يمر به كل جسيم ؟

الإجابة : يحمل كل من الجسيمين نفس الشحنة ولكن بإشارات متضادة . أما البروتون « فيهبط » خلال **انخفاض** فى الجهد مقداره 45 V ، والإلكترون « يهبط » خلال **ارتفاع** مقداره 45 V . أى أن كلاً منهما سيفقد نفس المقدار من طاقة الوضع PE . فبالنسبة للبروتون :

$$\Delta \text{PE} = (+e)(V_A - V_B) = (+1.6\times10^{-19}\ \text{C})(-45\ \text{V})$$

وبالنسبة للإلكترون :

$$\Delta PE = (-e)(V_B - V_A) = (-1.6 \times 10^{-19}\ C)(+45\ V)$$

سؤال : وهل يقتضى هذا أنهما سيصطدمان باللوحين بنفس مقدار السرعة ؟

الإجابة : لا . إنهما يكتسبان نفس المقدار من طاقة الحركة KE ولكن السرعة تعتمد على الكتلة ، وهى متباينة جدًا بالنسبة للجسمين . ولعلك تذكر أن $KE = \frac{1}{2}mv^2$

الحل والمناقشة : مقدار طاقة الوضع المفقودة فى كلتا الحالتين هو :

$$\Delta PE = -7.2 \times 10^{-18}\ J$$

وهو ما يساوى طاقة الحركة المكتسبة :

$$\Delta KE = \frac{1}{2}m_e v_e^2 = \frac{1}{2}m_p v_p^2 = -\Delta PE$$

وعلى هذا فإن :

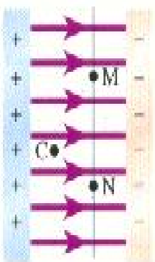
$$v_e = \sqrt{\frac{2(7.2\times10^{-18}\ J)}{9.1\times10^{-31}\ kg}} = 4.0 \times 10^6\ m/s$$

$$v_p = \sqrt{\frac{2(7.2\times10^{-18}\ J)}{1.67\times10^{-27}\ kg}} = 9.3 \times 10^4\ m/s$$

لاحظ مدى الفرق بين النتيجتين والذى سببه الاختلاف الكبير بين الكتلتين .

17-3 متساويات الجهد

لنقم الآن بإلقاء نظرة على نقط أخرى غير A و B فى المنطقة الواقعة بين اللوحين المشحونين المتوازيين . وقد نسأل ، مثلاً ، عن فرق الجهد بين النقطتين M و N فى الشكل 3-17 . وحيث أن فرق الجهد هو ببساطة الشغل المبذول على وحدة الشحنات (المعادلة 3-17) . فعلينا أن نحسب الشغل اللازم بذله لتحريك وحدة شحنات الاختبار الموجبة من النقطة M إلى N . ويلاحظ أنه للاحتفاظ بشحنة للاختبار فى مكانها فلابد من التأثير بقوة إلى اليسار عليها . . وهذه القوة مطلوبة لإحداث التوازن مع تأثير المجال الكهربى على شحنة الاختبار . فإذا حركنا الشحنة من M إلى N فإن قوة إحداث التوازن لن تبذل شغلاً لأن اتجاه الحركة متعامد مع اتجاه القوة . وبالفعل فإننا نعرف إنه ليست هناك حاجة لبذل أى شغل لتحريك شحنة الاختبار فى اتجاه متعامد مع المجال الكهربى . وهكذا فإنه لا يوجد فرق جهد بين النقطتين M و N فى الشكل 3-17 . وفى الواقع فإنه لابد أن يكون واضحًا أن كل النقط الواقعة على الخط المار خلال M و N تقع عند نفس الجهد ؛ أى لا يوجد بينها أى فرق للجهد . وسنطلق على هذا الخط ذى الجهد الثابت **خط تساوى الجهد** . وعلاوة على ذلك فإن المستوى الذى يمر بذلك الخط ويكون موازيًا للوحين هو الآخر مستوى ذو جهد ثابت وسنطلق عليه مستوى تساوى الجهد . ولا شغل يبذل لتحريك شحنة على امتداد خط تساوى الجهد أو فى مستوى



شكل 3-17:
تقع النقطتان M و N على خط تساوى الجهد .

تساوى الجهد، ولا شغل يبذل لتحريك شحنة على امتداد خط تساوى الجهد أو فى مستوى تساوى الجهد لأن مثل هذه الحركة تكون دائمًا متعامدة مع خطوط القوة أى مع المجال الكهربى أو بطريقة عكسية ، إن **خطوط القوة تكون دائمًا متعامدة مع خطوط تساوى الجهد .**

وكما سبق أن فعلنا فى حالة الجاذبية ، فإننا نستطيع إثبات أن الشغل المبذول فى تحريك شحنة بين نقطتين فى وجود مجال كهربى لا يعتمد على المسار المتبع بين الشحنتين . وأى مسار بين النقطتين M و N فى الشكل 3-17 يمكن اختزاله إلى مجموعة من الخطوات الصغيرة التى إما أن تكون موازية أو متعامدة مع خطوط تساوى الجهد . وحيث أنه لن يبذل شغل فى القطاعات الموازية لمستويات الجهد ، فإن الشغل يكون متناسبًا كلية مع الفرق بين إحداثيات النقطتين M و C مقاسة عموديًا على اللوحين . ونستنتج من ثم أن :

لا شك أننا نعرف خرائط المناسيب أو الخرائط الطبوغرافية والتى تبين الخطوط المناظرة للارتفاعات المتساوية كما فى حالة خريطة هذا الجبل . فالنقطة الواقعة عند نفس الارتفاع يكون لها نفس الجهد التثاقلى (جهد الجاذبية) ولذلك فإن خطوط المناسيب تعتبر خطوط تساوى الجهد بالنسبة للمجال التثاقلى (مجال الجاذبية) .



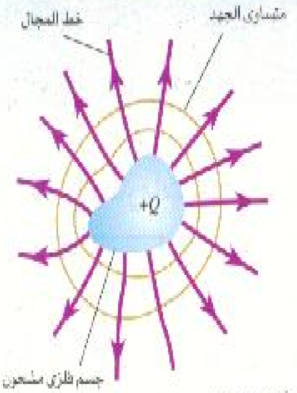


فرق الجهد الكهربى بين نقطتين لا يعتمد على اختيار المسار المقطوع بين النقطتين وتبين لنا هذه الخاصية أن المجال الكهربى الاستاتيكى ـ الساكن هو مجال احتفاظى .

وبالفعل فإن هذه الملاحظة ضرورية لنا حتى نتمكن من تعريف طاقة الوضع الكهربية ، وتطبيق بقاء الطاقة على مسائل كما فعلنا لتونا .

وقبل أن نترك مناقشة متساويات الجهد فلابد من استحضار بعض النتائج السابقة من القسم 13-16 بالنسبة للموصلات الموجودة فى مجالات كهربية . وحيث أنه لا يمكن لأى مجال كهربى أن يتواجد فى أى مكان داخل موصل تحت ظروف استاتيكية لذلك نستنتج أن :

حجوم وأسطح الموصلات تعتبر حجوم وأسطح تساوى الجهد تحت ظروف كهروستاتيكية .



شكل 4-17:
تكون متساويات الجهد متعامدة مع خطوط المجال .

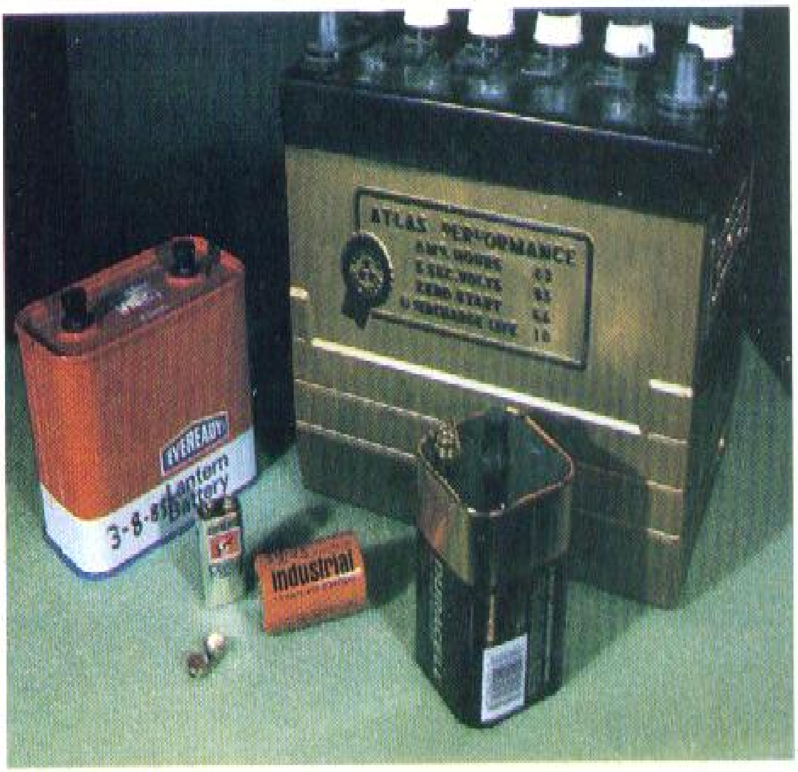
مثال توضيحى 2-17

خطوط متساويات الجهد وخطوط المجال الكهربى بالقرب من جسم معدنى صلب مشحون .

استدلال منطقى : انظر إلى الجسم المعدنى المشحون المبين بالمقطع المستعرض فى الشكل 4-17 . حيث أن الجسم يعتبر حجمًا متساوى الجهد لذلك فإن سطحه هو الآخر سطح تساوى الجهد . وبما أن خطوط القوة لابد وأن تكون متعامدة مع خطوط تساوى الجهد وأسطح تساوى الجهد ، فلابد أن تكون خطوط المجال الكهربى متعامدة مع سطح الجسم كما أن أسطح تساوى الجهد بالقرب من الموصل تتبع مناسيب السطح بدقة .

تمرين : افرض أن الجسم الموضح فى شكل 4-17 يرصد من مسافة بعيدة حتى ليبدو كنقطة صغيرة . ارسم متساويات الجهد وخطوط المجال كما ترصد فى هذه الحالة .

الإجابة : تكون خطوط المجال قطرية (شعاعية) وتكون متساويات الجهد دوائر .



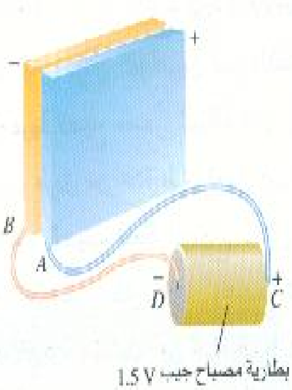
هناك أنواع وأحجام عديدة من البطاريات ، اعتمادًا على الفولطية والقدرة المقرر الحصول عليهما منها . وتتراوح النماذج المبينة هنا بين 1.5 V إلى 12 V .

4-17 البطاريات كمصادر للطاقة الكهربية

إن من أسهل الطرق للحصول على فرق للجهد بين نقطتين هو باستخدام بطارية وهناك العديد من أنواع البطاريات وأغلبها بالضرورة من النبيطات الكيميائية . فبطارية خلية الرصاص المستخدمة فى السيارات ، مثلا ، تستعمل التفاعل الكيميائى لتوفير الطاقة . ويعتبر نفس الشىء حقيقيًا بالنسبة « للخلية الجافة » والتى لا يعتبر باطنها جافًا على الرغم من التسمية . وبالإضافة إلى البطارية الكيميائية فقد أصبحت أطرزة أخرى شائعة هذه الأيام . ولعلك قد سمعت عن الخلايا الشمسية التى تستخدم لتوفير الطاقة للساعات والآلات الحاسبة اليدوية التى تستمد طاقتها من الشمس ، بل وعن الأغراض الأخرى الأكثر إثارة . والخلايا الشمسية التى تعمل على مبادئ مختلفة تمامًا عن البطاريات الكيميائية ، وتقوم بتحويل الضوء مباشر إلى طاقة كهربية . ويتم حاليًا

تطوير أطرزة أخرى من البطارية غير الكيميائية . وعلى الرغم من هذا التنوع الكبير إلا أن الغرض من أية بطارية هو فى النهاية توفير طاقة كهربية .

ولكل بطارية بسيطة طرفان (عمودان معدنيان) يوفران وسيلة لتوصيل الأسلاك إلى البطارية . والكمية التى عادة ما تسمى الفولطية هى فى الواقع فرق الجهد بين طرفى البطارية وهو 1.5 V بالنسبة لبطارية مصباح الجيب و 12 V بالنسبة لبطارية السيارة . وعندما يوصَّل طرفا البطارية بواسطة أسلاك إلى لوحين معدنيين كما فى الشكل 5-17 فإن الإلكترونات تسرى من الطرف السالب إلى أحد اللوحين (B فى الشكل 5-17) حتى يتخذ شحنة سالبة . ومصدر هذه الإلكترونات هو اللوح الآخر A وهو لهذا يصبح وقد صار لديه نقص فى الإلكترونات واكتسب بهذا شحنة موجبة صافية لها نفس المقدار . وبهذه الطريقة يمكن وصف البطارية على أنها « مضخة شحنات » يستخدم فيها مختلف العمليات الفيزيائية الداخلية لإنتاج الطاقة اللازمة لإتمام هذه الانتقال للشحنات .



شكل 5-17:
فرق الجهد من B إلى A هو 1.5 V ويمثل القوة الدافعة الكهربية للبطارية . والطرف C موجب وجهده أعلى بمقدار 1.5 V من الطرف D .

وكما أشير فى القسم 14-16 فإن الرمز المستخدم للبطارية هو —|⁺|— . وعادة ما ترفع علامة الموجب والسالب من على الرمز ومن المتوقع أن يصبح معروفًا أن الخط الأطول يمثل الطرف الموجب . وكثيرًا ما يزود الطرف الموجب للبطارية بعلامة الموجب أو يدهن باللون الأحمر .

ويعتمد فرق الجهد بين طرفى البطارية ـ إلى حد ما ـ على عما إذا ما كانت الشحنة تسرى من البطارية أم لا . وحين لا تسرى أية شحنة من البطارية فإن فرق جهدها يسمى عندئذ **القوة الدافعة الكهربية (emf)** للبطارية . وقد احتفظ بهذا المصطلح من القرن الماضى وهو فى الواقع مصطلح مغلوط لأن ما يطلق عليه (emf) ليس قوة على الإطلاق وإنما يمثل **فولطية** . على أنه فى كثير من التطبيقات يمكن اعتبار القوة الدافعة الكهربية للبطارية وفرق الجهد بين طرفيها ـ حتى عندما تسرى الشحنات منها ـ شيئًا واحدًا وسوف نشير إلى القوة الدافعة الكهربية (emf) بالرمز $\mathscr{E}$ على ألا يختلط هذا مع الرمز E لشدة المجال الكهربى .

سنقوم الآن بفحص الموقف الموضح فى الشكل 5-17 بشىء من التفصيل . عندما يوصل اللوحان المعدنيان اللذان هما فى الأصل غير مشحونين بالبطارية بواسطة سلكين معدنيين ، فإن الشحنات تسرى لفترة زمنية وجيزة إلى أن تنشر البطارية الشحنات على اللوحين . وبعد ذلك لن يسرى مزيد من الشحنات ويصبح الموقف كهروستاتيكيًا . وسوف نتذكر أن المعادن عبارة عن حجوم تساوى الجهد تحت الظروف الكهروستاتيكية ، ومن ثم يكون السلك الواصل من الطرف C إلى اللوح A واللوح نفسه عند نفس الجهد . وبالمثل فإن الطرف D ـ الذى يكون عند جهد أقل بما مقداره 1.5 V عن الطرف C ـ عند نفس جهد اللوح B . وعلى هذا يكون فرق الجهد بين اللوحين A و B هو 1.5 V بحيث يكون اللوح A ذا جهد أعلى لأنه موجب . وهكذا نستنتج أن : تحت ظروف كهروستاتيكية فإن : **فرق الجهد بين جسم معدنى متصل بأحد طرفى بطارية وجسم معدنى آخر متصل بالطرف الآخر يكون مساويًا لفرق الجهد الطرفى للبطارية .**

وقد رأينا فى القسم 2-17 أن الشحنات على اللوحين المشحونين لـهما طاقة وضع كهربية ، ولأن اللوحين فى الشكل 5-17 يكتسبان شحناتهما من البطارية ، فإن البطارية تصبح مصدرًا للطاقة التى تمثلها الشحنات الموجودة على اللوحين . وليس هذا سوى طريق من عدة طرق تعمل فيها البطارية كمصدر للطاقة . إذ عندما تضىء بطارية مصباح الجيب فتيلة المصباح ، فإن ما يصدر عن المصباح من طاقة حرارية وضوئية إنما يستمد من البطارية . . وعندما تقوم البطارية بتشغيل محرك كهربى فإن الطاقة الميكانيكية الناتجة عن المحرك تستمد من البطارية ومع تقدمنا فى دراسة الكهربية فإننا سنوالى تعلم المزيد عن مصادر أخرى للطاقة الكهربية .

مثال 3-17 :

ما هو الشغل الذى تبذله بطارية 12.0 V فى تحريك شحنة مقدارها 1 C من الطرف السالب إلى الطرف الموجب ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يرتبط الشغل بالفولطية ؟

الإجابة : تنص المعادلة 3-17 على أن $W = q\Delta V$.

سؤال : ما هو فرق الجهد عند الانتقال من الطرف السالب إلى الطرف الموجب ؟

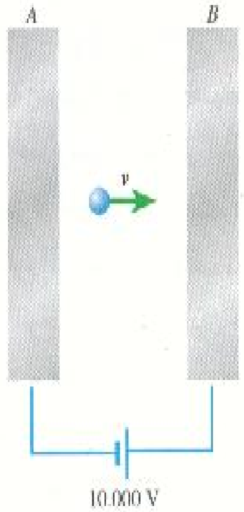
الإجابة : +12 V .

الحل والمناقشة : الشغل موجب

$$W = (1\ \mathrm{C})(+12.0\ \mathrm{V}) = +12.0\ \mathrm{J}$$

تتفق هذه الإجابة مع النص السابق على أن الشحنة الموجبة تزيد من EPE لـها عند تحريكها من الجهد الأقل إلى الجهد الأعلى .

تمرين : ما مقدار الشغل المبذول فى تحريك مليون إلكترون من الطرف الموجب إلى الطرف السالب ؟ **الإجابة** : 1.92×10^{-12} J .



شكل 6-17:
هل يزيد البروتون من سرعته أم يتباطأ عندما يأخذ فى الحركة نحو اللوح B ؟

مثال 4-17 :

البروتون الموضح فى الشكل 6-17 مقذوف من اللوح A نحو اللوح B . وهو يغادر اللوح A بسرعة مقدارها 8×10^6 m/s . وقد وصلت بطارية 10,000 V بين اللوحين المعدنيين كما هو موضح . ما هو مقدار السرعة التى يتحرك بها البروتون بمجرد اصطدامه باللوح B ؟ أعد نفس المسألة بنفس الأرقام بالنسبة للإلكترون .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يربط بين تغير مقدار السرعة والفولطية ؟

الإجابة : تمثل الحركة خلال فرق للجهد تغيراً فى طاقة الوضع الكهربية EPE . وهذا التغير يؤدى بدوره إلى تغير فى طاقة الحركة ومن ثم فى مقدار السرعة لأن الطاقة لابد وأن تكون محفوظة (باقية) :

$$\Delta EPE = q\Delta V = -\Delta KE$$

سؤال : هل يتحرك البروتون نحو الجهد الأعلى أم الأقل ؟

الإجابة : يشير رمز البطارية إلى أن اللوح B عند جهد أعلى بما مقداره 10,000 V عن الجهد عند A .

سؤال : ما هى المعادلة المحددة لتعيين مقدار سرعة البروتون ؟

الإجابة : $\frac{1}{2}m_p(v_B^2 - v_A^2) = -(+e)(v_B - V_A)$

سؤال : ما وجه اختلاف الموقف فى حالة الإلكترون ؟

الإجابة : سوف تحل m_e محل m_p والشحنة $-e$ محل $+e$.

الحل والمناقشة : بالنسبة للبروتون فإن الأرقام تؤدى إلى

$$v_B^2 = v_A^2 - \frac{2e(V_B - V_A)}{m_p} = (8 \times 10^6 \text{ m/s})^2 - \frac{2(1.6\times10^{-19}\text{C})(10^4\text{ V})}{1.67\times10^{-27}\text{kg}}$$

وهكذا فإن :

$$v_B = 7.9 \times 10^6 \text{ m/s}$$

أى أن البروتون يتباطأ كما ينبغى له عندما يتحرك نحو الجهد الأعلى وبالنسبة للإلكترون فإن التحرك نحو الجهد الأعلى يعنى زيادة مقدار سرعته :

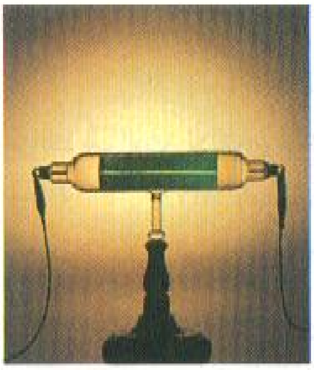
$$v_B^2 = v_A^2 - \frac{2(-e)(V_B - V_A)}{m_e}$$

لاحظ كيف أن الحد الثانى فى الطرف الأيمن من المعادلة **يضاف** فى هذه الحالة . ولابد أن تستطيع إثبات أن :

$$v_B = 6.0 \times 10^7 \text{ m/s}$$

وسيكون مقدار سرعة الإلكترون أقل قليلاً - فعليًا - عن هذه القيمة ، لأن معادلات النظرية النسبية لابد وأن تستخدم عندما تقترب مقادير السرعات من سرعة الضوء . (انظر القسم 11-3) .

تمرين : ما هو فرق الجهد الذى لابد أن يوجد بين اللوحين لو أن البروتون كان عليه أن يتوقف قبل أن يصل إلى B مباشرة ؟ **الإجابة : 3.34×10^5 V .**



فرق الجهد (الفولطية) المرتفع بين قطبين فى أنبوبة مفرغة يمكن أن يجعل حزمة من الإلكترونات تسرى بين القطبين . والقطب الذى تنبعث منه الإلكترونات يشار إليه على أنه المهبط ولذا تسمى الإلكترونات فى هذه الحزمة **أشعة المهبط** .

17-5 الإلكترون فولت

لابد وأنك قد أصبحت تعرف أن وحدة SI للطاقة هى الجول . على أن وحدة أخرى للطاقة تستخدم فى مجالى الفيزياء الذرية والفيزياء النووية . وتستخدم هذه الوحدة على

نطاق واسع بحيث لابد لنا من الاعتياد عليها . وتعّرف هذه الوحدة بدلالة طاقة شحنة مقدارها e اكتسبتها عند تحركها خلال فرق للجهد مقداره فولت واحد :

والكترون فولت واحد (eV) هو الطاقة التى تكتسبها شحنة مقدارها +e عندما تتحرك خلال فرق للجهد مقداره فولت واحد .

إن طاقة الحركة التى تكتسبها شحنة مقدارها q كولوم عندما تتحرك بحرية خلال فرق للجهد مقداره ΔV فولت :

$$\Delta KE\ (J) = -\Delta PE = q\ (C)\ \Delta V(V)$$

ومن التعريف السابق للإلكترون فولت فإن ،

$$\Delta KE(eV) = q\ (\text{بوحدات } e)\ \Delta V(V) \qquad (17\text{-}4)$$

وبمقارنة المعادلتين المعبرتين عن ΔKE نحصل على :

$$\Delta KE\ (eV) = \Delta\ KE\ (J)\ \frac{q(\text{بوحدات } e)}{q(C)}$$

وبما أن $1\,e = 1.602 \times 10^{-19}\ C$ فإن :

$$\Delta KE\ (eV) = (1.602 \times 10^{-19})\ \Delta KE\ (J)$$

وهكذا فإن معامل التحويل بين الإلكترون فولت والجول هو

$$1\ eV = 1.602 \times 10^{-19}\ J \qquad (17\text{-}5)$$

فى الفيزياء الذرية والنووية ، تحمل الجسيمات شحنات هى عبارة عن مضاعفات صحيحة للشحنة e أى $1.602 \times 10^{-19}\ C$ ولذا كانت تلك الشحنات ، مقاسة بوحدات e إما الوحدة أو أرقام صحيحة صغيرة أخرى .

وعندما يتحرك بروتون بحرية خلال فرق للجهد مقداره 1000 V مثلاً فإن طاقته ، طبقًا للمعادلة (17-4) هى

$$\Delta KE = (1e)\ (1000\ V) = 1000\ eV$$

وبالمثل ، فلو أن جسيمًا ذا شحنة مقدارها $3e$ قد تحرك خلال فرق للجهد مقداره 1000 V فإن الطاقة التى سيكتسبها هى $3 \times 1000 = 3000\ eV$. وعلى الرغم من أن وحدة الإلكترون فولت لا يمكن أن تستخدم فى معادلاتنا المبنية على وحدات SI ، إلا أن كونها ملائمة عند التعامل مع الجسيمات الأولية التى نلتقى بها فى الفيزياء الذرية والفيزياء النووية قد رسخ من استخدامها فى العلم .

مثال توضيحى 17-3

يستلزم اقتلاع إلكترون واحد منفرد من ذرة هيدروجين ليصبح حرًا طاقة مقدارها 13.6 eV . افترض أننا نرغب فى اقتلاع إلكترون ليصبح حرًا عن طريق قذف ذرات الهيدروجين ببروتونات عجّلت (سرّعت) خلال فرق للجهد V_{AB} . ما هو الحد الأدنى المطلوب لهذا المقدار V_{AB} ؟

استدلال منطقى : لابد أن يكون لدى كل بروتون طاقة مقدارها 13.6 eV على الأقل . وحيث أن كل بروتون له شحنة مقدارها 1.602×10^{-19} C ، لذا فطاقة كل بروتون مساوية عدديًا لفرق الجهد الذى تتحرك خلاله . ولهذا فإن فرق الجهد المطلوب هو 13.6 V .

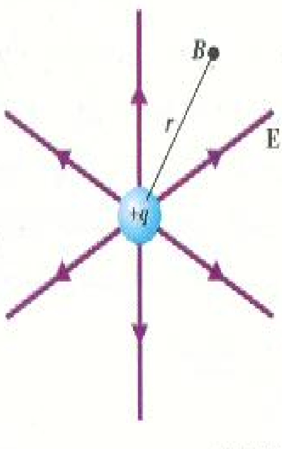
تمرين : أعد هذه المسألة لو كانت المقذوفات هى أيونات شحنة كل منها $3e$.

الإجابة : 4.53 V .

17-6 الجهود المطلقة

لقد اهتممنا حتى الآن بفروق الجهد فقط والسبب فى ذلك ، أنه مثلما كان الحال فى الجهد التثاقلى ، يكون اختيار موقع تكون فيه طاقة الوضع صفرًا مجرد مسألة اتفاق . ويمكن قياس طاقة الوضع التثاقلية بالنسبة لأية نقطة نختارها : مثل سطح منضدة ، أو سطح الأرض ، أو سطح مبنى أو أى مكان آخر . وبالمثل ففى مسائل طاقة الوضع الكهربية يكون تحديد الموقع الصفرى لطاقة الوضع مسألة اختيار . وفى نظرية الدوائر الكهربية ، قد يوصل سلك معين فى الدائرة بالأرض (ربما يتصل بإحدى أنابيب المياه) ، حيث تكون هذه النقطة عادة ذات طاقة وضع مقدارها صفر . على أننا غالبًا ما نستعمل صفرًا آخر بالنسبة للجهد الكهربى كما سنرى بعد قليل .

عندما نتناول شحنات نقطية كالذرات والجزيئات فإنه من المناسب تحديد صفر الجهد على أنه يقع عند مسافة لا نهائية من الشحنة . وفى هذه الحالات فإن الجهد عند أية مسافة محددة r سيقال إنه **جهد مطلق** عند تلك النقطة والحقيقة إن ما نقوم بعمله هو ما يلى . لقد ناقشنا حتى الآن حالات مختلفة بدلالة فروق الجهد V_{AB} . أما الآن فسوف ننص على أن النقطة A سيفترض أنها تقع عند اللانهاية . ثم ننص على أن الجهد عند اللانهاية سيعتبر صفرًا بحيث يصبح الجهد عند B هو ما نشير إليه على أنه الجهد المطلق عند B وعلينا أن نلاحظ بدقة أنه **عندما نتحدث عن الجهد المطلق فى نقطة ما فإننا نتحدث ، فى الحقيقة ، عن فرق الجهد بين تلك النقطة واللانهاية .**



شكل 7-17:
يُعرَّف الجهد المطلق عند B على أنه الشغل المبذول فى حمل شحنة اختبار موجبة من اللانهاية حتى النقطة B .

سنقوم الآن بإيجاد معادلة للجهد المطلق الناشئ عن شحنة منعزلة مقدارها $+q$ ، كالتى ترى فى الشكل 7-17 . ونحتاج إلى حساب الشغل اللازم بذله لإحضار شحنة اختبار موجبة q_t من $r = \infty$ حتى نقطة تبعد مسافة r عن q . ولن يكون هذا بسيطًا مثلما أوجدنا فرق الجهد بين لوحين مشحونين ، لأننا لم يعد لدينا قيمة ثابتة للمجال E . وفى المقابل فإن علينا حساب الشغل المبذول بواسطة قوة تتغير تبعًا لتغير $1/r^2$. وإجراء ذلك بشكل صحيح يستوجب معرفة طرق التفاضل والتكامل ولهذا سنذكر ببساطة نتائج الحسابات بتلك الطرق :

$$W(\infty \to r) = q_t \frac{kq}{r}$$

حيث k هو الثابت المذكور فى قانون كولوم للقوة . وعندما نقسم الطرفين على q_t فإننا نحصل على تعبير للجهد المطلق V_{abs} الناشئ عن شحنة نقطية منعزلة q (أو عن توزيع كروى التماثل للشحنة)

$$V_{abs} = \frac{W(\infty \to r)}{q_t} = \frac{kq}{r} \qquad (17\text{-}6)$$

ويعتبر هذا التعبير قائمًا بالنسبة لشحنة نقطية سالبة . وتفيد المعادلة 6-17 بمعلومة مهمة هى :

إن V_{abs} الناشئ عن شحنة موجبة q يكون له قيم موجبة عند جميع المسافات r بعيدًا عن q . وبالنسبة لشحنة سالبة $-q$ فإن V يكون سالبًا عند جميع المسافات r .

وهكذا فإننا نستطيع استعمال هذه النتائج فى حساب الجهد المطلق عند نقطة ما ، والناشئ عن مجموعة من الشحنات النقطية . وبما أن الجهد كمية قياسية ، فلن نحتاج سوى لحساب مقادير V_{abc} لكل شحنة منفردة ثم نجمع إسهامات الشحنات جمعًا جبريًا .

مثال 5-17 :

افترض أن $r = 50$ cm وأن $q = 5.0 \times 10^{-6}$ C فى الشكل 7-17 . ولو أن بروتونًا أطلق عند النقطة B ، فكم سيكون مقدار سرعته عندما يبتعد كثيرًا ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يربط بين مقدار السرعة والمسافة فى هذه الحالة ؟

الإجابة : مثلما فعلنا فى السابق ، فإن البروتون سيكتسب KE كلما فقد PE عند تحركه نحو جهد أقل .

سؤال : ماذا يعنى مصطلح « عندما يبتعد كثيرًا » ؟

الإجابة : من الناحية العلمية فإنه يعنى أن يكون بعيدًا بما فيه الكفاية لكى تصبح القيمة النهائية للجهد صفرًا بالضرورة .

سؤال : كيف تحصل على القيمة الابتدائية للجهد ؟

الإجابة : عليك بتقدير قيمة V_{abc} عند مسافة 50 cm من الشحنة $+5\,\mu$C :

$$V_{abc} = \frac{kQ}{r} = \frac{(9\times10^{9}\ \mathrm{N.m^2/C^2})(5\ \mu\mathrm{C})}{0.5\ \mathrm{m}}$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تتيح الحصول على مقدار السرعة المكتسبة ؟

الإجابة : $e\,\Delta V = eV_{abc} = \frac{1}{2} m_p v^2$

الحل والمناقشة : أولاً ، الجهد الابتدائى هو :

$$V_{abc} = \frac{kQ}{r} = \frac{(9\times10^9\ N.m^2/C^2)(5\ \mu C)}{0.5\ m} = +90\ kV$$

ومن ثم يفقد البروتون مقدارًا من طاقة الوضع يساوى :

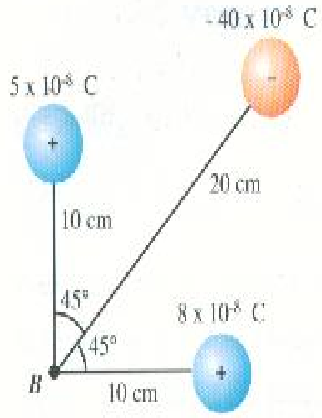
$$\Delta PE = (1.6\times10^{-19}\ C)(-90\times10^3\ V) = -1.44\times10^{-14}\ J$$

ويمكن الحصول على السرعة المكتسبة من المعادلة $\Delta KE = -\Delta PE$:

$$\frac{1}{2}(1.67\times10^{-27}\ kg)\,v^2 = 1.44\times10^{-14}\ J$$

$$v = 4.15\times10^6\ m/s$$

تمرين : لكى تستشعر معنى « بعيدًا جدًا » الوارد فى هذا المثال ، عليك حساب المسافة التى يهبط عندها الجهد إلى 900 V (أى إلى نحو واحد بالمائة من الجهد عند الموضع الأصلى للبروتون) . **الإجابة** : 50 m .



شكل 17-8:
أوجد الجهد المطلق عند النقطة B والناشئ عن الشحنات الثلاث .

مثال 17-6

احسب قيمة الجهد المطلق عند النقطة B بالقرب من الشحنات النقطية الثلاث فى الشكل 17-8 .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يمكن حساب الجهد عندما يكون هناك أكثر من شحنة نقطية ؟

الإجابة : يمكنك حساب الجهد عند B ، الناشئ عن كل شحنة بمفردها وكما لو كانت الشحنات الأخرى غير موجودة . ويكون الجهد الكلى هو حاصل الجمع الجبرى للإسهامات المنفردة . ومرة أخرى هذا هو مبدأ التراكب ولكنه هنا باستخدام كميات **قياسية** .

سؤال : وما هو التعبير المستخدم لكل إسهام ؟

الإجابة : $V = kQ/r$ ، حيث r هى بعد كل شحنة عن B .

سؤال : ما هو مدلول إشارات الشحنات ؟

الإجابة : لنتذكر ، أن الشحنات الموجبة تنشئ جهودًا مطلقة موجبة فقط ، وتنتج الشحنات السالبة جهودًا سالبة فقط . وعليك أن تحافظ على الإشارات المقترنة بكل حد حين تقوم بجمعها .

الحل والمناقشة : يوضح الشكل 17-8 المسافات المختلفة . والإسهامات المختلفة فى الجهد عند B هى :

$$V_1 = \frac{(9\times10^9\ N.m^2/C^2)(+5.0\times10^{-8}\ C)}{0.10\ m} = +4500\ V$$

$$V_2 = \frac{(9\times10^9\ N.m^2/C^2)(-40\times10^{-8}\ C)}{0.20\ m} = -18000\ V$$

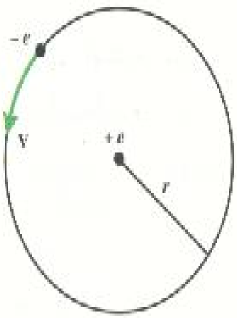
$$V_3 = \frac{(9\times10^9\ N.m^2/C^2)(+8\times10^{-8}\ C)}{0.10\ m} = +7200\ V$$

والجهد الكلى عند B هو :

$$V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3$$
$$= 4500\ V + (-18000\ V) + 7200\ V = -6300\ V$$

لاحظ مدى بساطة هذه الحسابات بالمقارنة مع حساب المجال الكهربى . فمع الجهود لن تكون بحاجة إلى مركبات المتجهات ، وإنما لمجرد أرقام موجبة وسالبة تقوم بجمعها .

تمرين : ما هو مقدار الطاقة المطلوب لإحضار إلكترون إلى النقطة B من مسافة بعيدة جدًا ؟ **الإجابة** : **+6300 eV** أو **1.01×10^{-15} J** .



شكل 9-17:
نموذج بوهر لذرة الهيدروجين . يتحرك الإلكترون فى مدار دائرى نصف قطره **0.053 *nm*** حول مركز الذرة .

مثال 7-17 :

فى نموذج بوهر لذرة الهيدروجين المرسومة تخطيطيًا فى الشكل 9-17 يتحرك الإلكترون المثل بنقطة $(q = -e)$ فى مدار دائرى نصف قطره $r = 0.053\ nm$ مع وجود بروتون $(q = +e)$ فى المركز . (أ) احسب طاقة الوضع الكهربية وطاقة الحركة لإلكترون فى المدار . (ب) إثبت أنه كما ذكر فى المثال التوضيحى رقم 3-17 ، فإن طاقة مقدارها 13.6 eV ضرورية لأن تستمد من مصادر خارجية حتى تجذب الإلكترون وتحرره من الذرة ، بمعنى أن تؤين الذرة .

استدلال منطقى :

سؤال : هل أستطيع ، حال تحرك الإلكترون ، أن استخدم المعادلة الاستاتيكية لحساب طاقة الوضع الكهربية (EPE) بين شحنتين نقطيتين ؟

الإجابة : نعم . فعلى الرغم من تحرك الإلكترون ، إلا أن المسافة r تظل ثابتة . وإلى جانب الشحنة فهذه هى الكمية الوحيدة التى تعتمد عليها EPE .

سؤال : ما هى المعادلة الخاصة بطاقة الوضع الكهربية للإلكترون ؟

الإجابة : إننا نختار أن تكون طاقة الوضع الكهربية صفرًا عند $r = \infty$ ، حيث تكون القوة التى يؤثر بها كل من الإلكترون والبروتون أحدهما على الآخر صفرًا ومن ثم فإن :

$$(EPE) = (-e)\ V_{abs}$$

حيث V_{abs} هو الجهد المطلق ، الناشئ عن وجود البروتون ، على مسافة تساوى نصف قطر مدار الإلكترون .

سؤال : ما هو الجهد المطلق على مسافة r من البروتون ؟

الإجابة : $V_{abs} = \frac{ke}{r}$. ومن ثم فإن $EPE = (-e)\ V = -\frac{ke^2}{r}$. وعليك ملاحظة أن الإلكترون ستكون له قيمة سالبة للكمية EPE عند جميع قيم r .

سؤال : ما هو نوع الحركة التى يقوم بها الإلكترون ؟

الإجابة : إنها حركة دائرية بسرعة ثابتة المقدار .

سؤال : وما هى المعادلة التى تصف هذا النوع من الحركة ؟

الإجابة : يتطلب قانون نيوتن الثانى أن تكون القوة الصافية المؤثرة على الإلكترون مساوية لحاصل ضرب كتلته فى تسارع (عجلة) الجذب المركزى له :

$$F_{net} = m_e \frac{v^2}{r}$$

سؤال : ما هى القوة الصافية المؤثرة على الإلكترون ؟

الإجابة : إنها القوة الكهربية ، التى يُعطى مقدارها بقانون كولوم :

$$F = \frac{k(e)(e)}{r^2}$$

سؤال : كيف ترتبط معادلة قوة الجذب المركزى مع طاقة حركة الإلكترون ؟

الإجابة : لاحظ أنه ، بما أن $KE = \frac{1}{2}mv^2$ ، فإن معادلة قوة الجذب المركزى يمكن كتابتها على الصورة :

$$F_{net} = \frac{2(KE)}{r}$$

وهكذا تستطيع أن تحصل على KE من :

$$KE = \left(\frac{r}{2}\right)F_{net} = \frac{r}{2}\ \frac{ke^2}{r^2} = \frac{ke^2}{2r}$$

و KE كمية موجبة كما هو شأنها دائمًا . **لاحظ أن مقدارها هو نصف مقدار PE تمامًا .**

سؤال : ما الذى لابد من حدوثه للإلكترونات التى ستنتزع من الذرة وتحرر ؟

الإجابة : لو أن الإلكترون كان مثبتًا على بعد r من البروتون ، فإن مقدارًا من الشغل يساوى طاقة وضعه PE ، كان سيصبح لزامًا بذله على الإلكترون عندما يجذب حتى $r = \infty$:

$$W = PE(\infty) - PE(r) = 0 - \left(\frac{-ke^2}{r}\right) = \frac{ke^2}{r}$$

وقد تكون إحدى طرق إجراء ذلك هى بإعطاء الإلكترون هذا القدر تمامًا من KE فى موضعه الابتدائى حتى يصبح قادرًا على الوصول إلى $r = \infty$ قبل أن يتوقف تمامًا . على أن الإلكترون **ليس** مثبتًا ، فلديه بالفعل طاقة حركة مقدارها $KE = \frac{1}{2}(ke^2/r)$. وعلى هذا فطاقة الحركة KE **الإضافية** التى عليه اكتسابها (ربما عند اصطدامه بذرة أخرى) حتى يتحرر لن تكون سوى $\frac{1}{2}ke^2/r$ أخرى .

الحل والمناقشة : لقد وجدنا أن الجهد نتيجة وجود البروتون هو :

$$V_{abc} = \frac{ke}{r}$$

$$= \frac{(9\times10^{9}\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)(1.6\times10^{-19}\ \text{C})}{5.3\times10^{-11}\ \text{m}}$$

$$= 27.2\ \text{V}$$

ونستطيع من ثم القول بأن طاقة وضع الإلكترون PE هى

$$PE = (-e)\ V_{abc} = -(1e)\ (27.2\ \text{V}) = -27.2\ \text{eV}$$

وطاقة حركة الإلكترون KE هى نصف هذا المقدار :

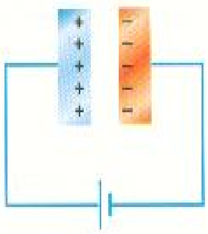
$$KE = +13.6\ \text{eV}$$

أما **الطاقة الكلية** للإلكترون ، PE + KE فهى

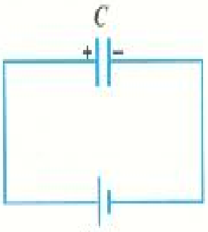
$$KE + PE = -13.6\ \text{eV}$$

وعلى هذا يكون المقدار الإضافى لطاقة الحركة والمطلوب لتحرير الإلكترون هو +13.6 eV . وهذا المقدار هو ما نسميه **طاقة التأين** (أو طاقة الربط) للهيدروجين . ومما يذكر أنه حتى نموذج بوهر المفرط فى البساطة يقدم مقادير لهذه الطاقة ، متفقة بدقة مع القيم المعملية .

17-7 المكثفات



(أ)



(ب)

شكل 10-17:
تستقر الشحنات المتعاكسة والمتساوية على الوجهين الداخليين للوحى المكثف . لاحظ الرمز المستخدم للدلالة على المكثف فى (ب) .

لقد أشرنا كثيرًا إلى منظومة لوحين معدنيين مشحونين بشكل متضاد . وهذا فى الواقع هو أحد أشكال نبيطة (أداة) على قدر كبير من الأهمية العملية بالنسبة لتخزين الطاقة والشحنة الكهربيين ، كما سنرى فى فصول لاحقة . وتسمى هذه الأداة **مكثفًا** . وترى وهى متصلة ببطارية فى الشكل 10-17 . وقد ناقشنا فى القسم 4-17 كيف تنقل البطارية شحنات موجبة وسالبة إلى اللوحين كما فى الشكل 10-17 (أ) . ولا يظهر فى الشكل من اللوحين سوى حوافهما؛ إذ إن سطحيهما المستويين يواجه كل منهما الآخر . وسرعان ما تتحقق الظروف الكهروستاتيكية والتى يكون فيها فرق الجهد بين اللوحين مساويًا للقوة الدافعة الكهربية للبطارية ؛ حتى إذا فصلت البطارية بعد ذلك فإن اللوحين يظلان مشحونين إلى مستوى ذلك الجهد . وعلى هذا يكون المكثف أداة قادرة على **تخزين الشحنة** . والرمز المستخدم للدلالة على المكثف ، كما هو موضح بالشكل 10-17 (ب) هو —||— .

سنقوم بالرمز إلى الشحنات على اللوحين بالحرفين $+q$ و $-q$. وسنفترض أن هذه الشحنات منثورة بانتظام فوق المساحة A للوحين ، ومعنى هذا أن كثافتى الشحنة على اللوحين هما $\sigma = q/A$ و $-q/A$. وقد رأينا فى الفصل السادس عشر أن المجال الكهربى بين اللوحين المشحونين هو :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{A\epsilon_0}$$

أما الجهد V بين اللوحين فيرتبط بالمجال الكهربى بالعلاقة :

$$V = Ed = \frac{d}{A\epsilon_0}q \qquad (17\text{-}7)$$

حيث d هى المسافة بين اللوحين . وهكذا نرى أن V تتناسب مع q ، وهى نتيجة عامة ، قابلة للتطبيق على أشكال أخرى للمكثفات بنفس الدرجة .



تصنع المكثفات بمختلف الأحجام لأداء عدد كبير من الوظائف فى الدوائر الكهربية .

السعة C للوحين هى النسبة بين الشحنة المختزنة على اللوحين والجهد بينهما:

$$C = \frac{q}{V} \qquad (17\text{-}8)$$

أى أن وحدات SI للسعة هى كولوم لكل فولت . وسنطلق على هذه الكمية المشتقة اسم فاراد (نسبة إلى الفيزيائى الانجليزى مايكل فاراداى) .

فاراد (F) واحد = كولوم واحد لكل فولت (C/V)

ويمكننا من المعادلة 7-17 أن نحدد سعة منظومة اللوحين المتوازيين :

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \qquad \text{(لوحين متوازيين)} \qquad (17\text{-}9)$$

عليك إثبات أن هذه المعادلة تؤدى بالفعل إلى وحدات الفاراد .

وهناك نقطة مهمة جديرة بالملاحظة وهى أن السعة خاصية لأداة (نبيطة) خاصة . **وإذا عرفت أبعاد وشكل مكثف ما ، فإن سعته تكون قد تحددت* بغض النظر عن**

* سنرى فى القسم 9-17 أن المادة المحيطة بالسطحين المشحونين تؤثر أيضًا على السعة . وإذا شئنا الدقة والتحديد فإن المعادلة (9-17) تمثل لوحين متوازيين فى الفراغ .

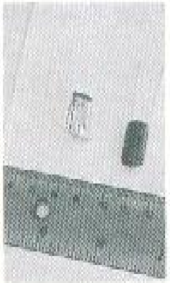
مقدار الشحنة المختزنة فيه . فبالنسبة للوحين المتوازيين مثلاً ، فإن C تتعين تماماً بمساحة اللوحين والمسافة بينهما .

والفاراد كمية هائلة من السعة ولذلك فإن قيم C المتداولة فى الأجهزة العملية تكون عادة من رتبة μF أو أقل . وبالنسبة للوحين مساحة كل منهما $100\ cm^2$ مثلاً ، وتفصلهما مسافة مقدارها $1\ mm$ ، تكون السعة هى :

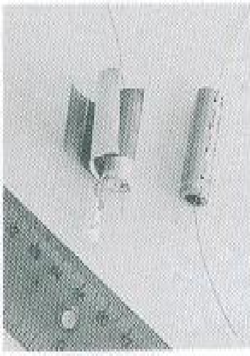
$$C = \frac{(8.85\times10^{-12}\ C^2/N.m^2)(100\times10^{-4}\ m^2)}{10^{-3}\ m}$$

$$= 8.85\times10^{-11}\ F = 88.5\ (pF)$$ بيكوفاراد أو

تحتوى معظم المكثفات ذات اللوحين المتوازيين ـ من الناحية العملية ـ على شريحة من مادة غير موصلة موضوعة بين اللوحين المعدنيين . وتسمح هذه الشريحة للوحين أن يوضعا بالقرب من بعضهما البعض دون خوف من تلامسهما بحيث تتحد الشحنات معًا . ويصنع الكثير من المكثفات المتاحة تجاريًا باستخدام رقيقتين معدنيتين إحداهما فوق الأخرى ووضع غشاء بلاستيكى رقيق بينهما ليمنع حدوث التلامس بينهما . ثم تطوى الطبقات الثلاث بإحكام لنحصل على أسطوانة يتم بعد ذلك تغليفها لتصبح سهلة التداول . والأداة بهذا الشكل هى بالضرورة مكثف متوازى اللوحين وإن كانت تبدو مختلفة تمامًا عن الرسم الموجود فى الشكل 10–17 . والمكثفات التى سعتها $0.10\ \mu F$، وهو الحجم الشائع لا تشغل حيزًا يزيد عن $1\ cm^3$ عندما تصنع بهذه الطريقة . ويبين الشكل 11–17 مكثفين شائعى الاستعمال.



(أ)



(ب)

شكل 11–17:
تعمل صفيحتان من رقيقة معدنية تفصلهما مادة عازلة كلوحين فى مكثف تجارى ولو تم لف الصفيحتين أو ثنيهما ليتخذا حجمًا مضغوطًا فإن المكثف ذى اللوحين المتوازيين يمكن اختزاله إلى أى حجم مناسب . ويرى بالشكل نوعان من المكثفات فى هيئتهما الأصلية وعند فكهما جزئيًا .

(أ) مكثف سعته $100\ pF$ مما يستخدم فيه شريحة رقيقة من البلاستيك كعازل . (ب) مكثف إلكتروليتى سعته $740\ \mu F$ تستخدم فيه قشرة رقيقة من أحد الأكاسيد تغطى الرقيقة المعدنية وتعمل كعازل ويتم فصل الصفيحتين المعدنيتين بواسطة شريحة ورقيقة مشبعة بإلكتروليت رطب . وعلى الرغم من أن المكثفات الإلكتروليتية تتمتع بسعة كبيرة ، إلا أنها عادة لا تتحمل الجهود الكهربية المرتفعة .

مثال 8-17 :

ما هى سعة كرة معدنية منعزلة ونصف قطرها $R = 10\ cm$ ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يتسنى لموصل منعزل أن تكون له سعة ؟

الإجابة : إن كلمة « منعزل » تعنى أن الشحنات الأخرى تقع عمليًا على أبعاد لا نهائية منه ، وهذا هو نفس المبدأ ، الذى يتيح لنا أن نعرف الجهود المطلقة لشحنات نقطية أو كروية . فإذا كانت هناك شحنة مقدارها q فوق كرة ، فإنها تتسبب فى جهد مطلق V عند كل نقطة خارج الكرة . ويظل التعريف العام للسعة $C = q/V$ قائمًا فى جميع الحالات.

سؤال : لو كانت الكرة تحمل شحنة مقدارها q فما الجهد V الذى ينطبق على هذه المسألة ؟

الإجابة : إنك تود أن تحسب الفولطية (فرق الجهد) بين الكرة الموصلة واللانهاية ولهذا فإن V_{abc} عند سطح الكرة هو ما يستخدم .

سؤال : ما قيمة q/V_{abc} بالنسبة للكرة ؟

الإجابة : تنطبق المعادلة 6–17 بالنسبة لشحنات نقطية وكروية.

$V = kq/r = q/4\pi\epsilon_0 r$ طالما كان r عند سطح الكرة أو خارجه.

سؤال : وما الذى يتيحه لى ذلك عند حساب السعة C ؟

الإجابة : $C = q/V = q/(kq/R) = R/k = 4\pi\epsilon_0 R$

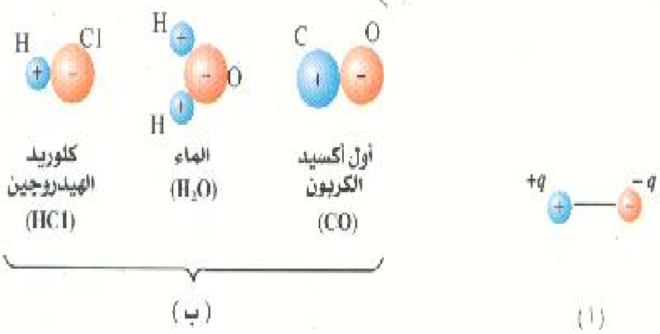
حيث استخدمنه العلاقة $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. أما R فهو نصف قطر الكرة .

الحل والمناقشة : لاحظ أن $C = 4\pi\epsilon_0 R$ وهو مقدار ثابت بالنسبة لكرة معينة . وهذا مثال آخر على أن السعة تعتمد فقط على أبعاد وهندسة الأجسام التى تختزن الشحنة . وإذا عوضنا بالأرقام فإن:

$$C = \frac{R}{k} = \frac{0.1\,\text{m}}{9\times10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2} = 11.1\,\text{pF}$$

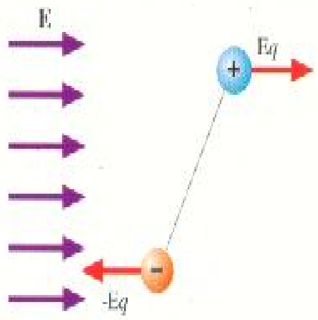
17-8 العوازل

على الرغم من حقيقة أن غير الموصلات لا تحتوى على شحنًا حرة ، إلا أن لها تأثيرًا واضحًا على المجالات الكهربية التى توضع فيها . وهذه المواد التى يطلق عليها عوازل فى هذه السياق تميل إلى الإلغاء الجزئى للمجالات الكهربية التى تنشأ من الأجسام الشحونة . وسنرى الآن كيف تقوم هذه المواد بذلك .



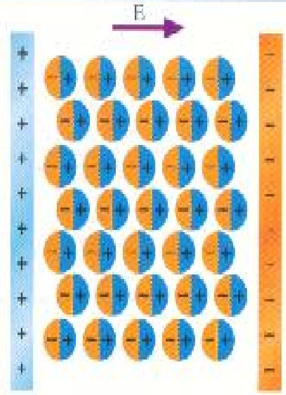
شكل 17-12: الجزيئات ثنائية القطب فى (ب) تتصرف مثل ثنائى القطب فى (أ) .

يمكننا تقسيم العوازل إلى مجموعتين ، الأولى تحتوى على ثنائيات قطب جزيئية والأخرى لا تحتوى . **وثنائى القطب** يتكون من شحنتين متساويتين فى المقدار ومختلفتين فى الإشارة وتفصلهما مسافة صغيرة كما يوضح ذلك الشكل 12-17 (أ) والكثير من الجزيئات تكون ـ على الرغم من أنها متعادلة كهربيًا (أى غير مشحونة) ـ على هيئة ثنائيات قطب ضئيلة . ويوضح الشكل 12-17 (ب) بعض أمثلة تلك الجزيئات . ومثل هذه الجزيئات تسمى جزيئات ثنائية القطب . وعندما يوضع أحد هذه الجزيئات فى مجال كهربى ، كما فى الشكل 13-17 فإن طرفيه المشحونين بشحنات متعاكسة يقعان تحت تأثير قوتين متساويتين فى المقدار ومتعاكستين فى الاتجاه ($\mathbf{E}q$ و $-\mathbf{E}q$) ويميل العزم الناتج إلى التأثير على الجزئ وجعله يصطف باتجاه المجال الكهربى . ونتيجة لهذا فإن الجزيئات ثنائية القطب الموجودة بين اللوحين المشحونين تميل إلى أن تصطف فى صفوف كما يوضح الشكل 14-17 . ومن الناحية العملية ، تقوم الحركة الحرارية بالحيلولة دون حدوث تراص كامل للجزيئات فى اتجاه المجال الكهربى إلا إذا كان ذلك المجال قويًا للغاية .



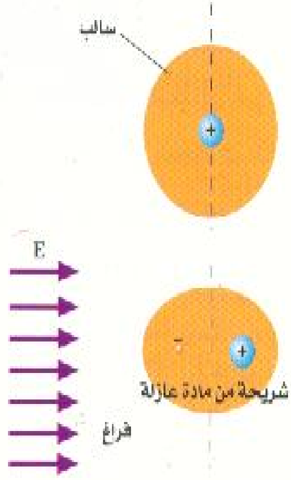
شكل 17-13: يتسبب المجال الكهربى فى جعل ثنائى القطب يقع تحت تأثير عزم دوران يميل إلى النظام ثنائى القطب فى اتجاه المجال .

الذرات وكثير من الجزيئات ليست فى العادة ثنائية القطب . وعلى الرغم من إنها تتألف من إلكترونات سالبة الشحنة ونوى موجب الشحنة إلا أن المراكز الفعالة لكلا النوعين من الشحنة تتطابق كما يوضح أعلى الشكل 15–17 . وهكذا تتصرف هذه الذرات والجزيئات كما لو كانت الشحنات السالبة والموجبة غير منفصلة عن بعضها البعض ولذا فإنها لا تمتلك ثنائى قطب دائم . ومع هذا ، فعندما توضع مثل هذه الذرة أو هذا الجزئ فى مجال كهربى ، كما هو موضح فى الجزء السفلى من الشكل 15–17 فإن الإلكترونات سالبة الشحنة تنجذب بشكل طفيف نحو اليسار أما النواة موجبة الشحنة فإنها تُدفع بشكل طفيف إلى اليمين . وتتسبب هذه الزحزحة الطفيفة للشحنات فى جعل الذرة (أو الجزئ) تصبح ثنائى قطب ، وعندئذ يقال أنها (أو أنه) قد **استقطبت (أو استقطب)** ، وأنها أصبحت تمتلك ثنائى قطب مستحث .



شكل 14–17:
تصطف ثنائيات القطب بامتداد خطوط المجال .

وهكذا نرى أن كل المواد العازلة ، إذا وضعت فى مجال كهربى ، فإن ذراتها تصبح ثنائيات قطب مصطفة فى اتجاه المجال كما فى الشكل 14–17 . لاحظ كيف أن اللوح الموجب يعمل على جعل الأطراف السالبة لثنائيات القطب تقترب منه بينما يجذب اللوح السالب الأطراف الموجبة . ولاحظ أيضًا فى الشكل 14–17 أن اصطفاف ثنائيات القطب فى صفوف يجعل طبقة من الشحنات الموجبة (هى الأطراف الموجبة لثنائيات القطب) تتواجد بالقرب من اللوح الذى إلى اليمين . وبالمثل فهناك طبقة من الشحنات السالبة بالقرب من اللوح الذى إلى اليسار . وعند وضع شريحة من مادة عازلة بين اللوحين كما فى الشكل 16–17 فإن ترتيب ثنائيات القطب يجعل الشحنات تظهر على وجهى الشريحة . وليست هذه الشحنات سوى الأطراف المشحونة لثنائيات القطب البادية عند سطحى العازل . وسوف نشير إلى هذا النوع من الشحنات على أنه شحنة الاستقطاب المستحث أو الشحنة المقيدة . وتعكس التسمية الأخيرة حقيقة أن هذه الشحنة مقيدة إلى الذرات والجزيئات داخل العازل ؛ أى أنها ليست حرة لأن تتحرك بعيدًا عن الذرة أو الجزء الذى تنتمى إليه .



شكل 15–17:
(أ) فى الظروف العادية فإن الإلكترونات السالبة ـ فى ذرة أو جزئ غير قطبية ـ تتخذ توزيعًا متماثلاً للشحنة حول النواة الموجبة . (ب) وتوزيع الشحنة الإلكترونية يتزحزح بعيدًا عن النواة وفى اتجاه يعاكس اتجاه المجال E الذى تتواجد فيه الذرات . (لماذا ؟) وهذا ما يجعل الذرة أو الجزئ يصبح ثنائى قطب مستحث .

ويختلف مقدار الشحنة المقيدة التى يمكن أن تستحث عند سطح جسم ما من مادة إلى أخرى ؛ فنحن نعلم ، مثلاً ، أن باطن موصل ما لابد وأن يكون منطقة خالية من المجال الكهربى . ولهذا فلو أدخلت شريحة معدنية (أو موصلة) بين اللوحين فإن الشحنة السطحية المستحثة لابد وأن تتساوى مع الشحنة على اللوحين ؛ وهذا يلغى تمامًا المجال داخل الموصل ؛ كما هو موضح فى الشكل 17–17 . لاحظ أن كل خطوط المجال تنتهى عند السطح السالب للموصل وتبدأ مرة أخرى عند السطح الموجب ؛ وأنه لا توجد خطوط للمجال داخل الموصل.

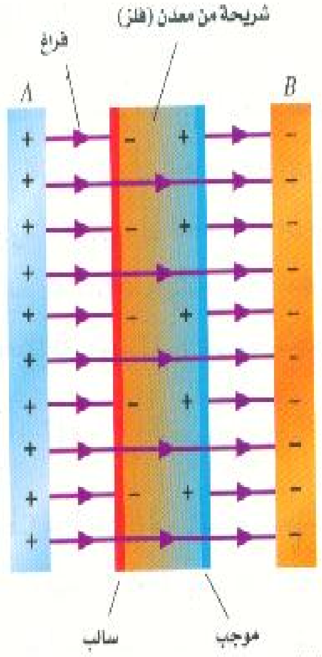
أما بالنسبة للعوازل فالشحنة المستحثة تكون أقل من الشحنة الموجودة على اللوحين ؛ ولهذا فلن تنتهى كل خطوط المجال على شحنات عند سطح العازل ، لأن بعضها يتخلل المادة العازلة كما هو موضح فى الشكل 16–17 . **والنتيجة العامة هى أن المجال الكهربى داخل العازل يكون أقل من المجال الخارجى المطبق عليه** . وكلما كان من السهل على المادة أن تستقطب ، كلما زاد الفرق بين المجال الداخلى والمجال الخارجى .

وتوصف قدرة العازل على خفض شدة المجال الكهربى بكمية تسمى **ثابت العزل K** له ويمكن تعريفه بالرجوع إلى الشكل 16-17 :

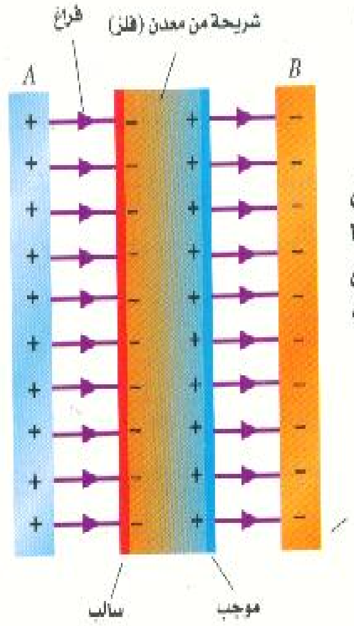
$$K \text{ ثابت العزل } = \frac{\text{المجال الكهربى فى الفراغ}}{\text{المجال الكهربى فى العازل}}$$

أى أن المجال الكهربى داخل عازل ما ليس سوى $(1/K)$ من قيمته خارجه .

ويتضمن الجدول 1-17 قيمًا نموذجية لثوابت العزل لبعض المواد . لاحظ أن الفراغ لا يغير المجال مطلقًا ولذا كان ثابت عزله يساوى الوحدة . ولما كان الهواء لا يحتوى إلا على عدد قليل من الجزيئات فى وحدة الحجوم ، فإن ثابت عزله لا يختلف إلا اختلافًا طفيفًا عن ذلك الذى للفراغ . وبالنسبة لمعظم الجوامد فإن K يقع فى المدى من 2 إلى 10 . وعلى الرغم من أننا لا نعتبر الفلزات (المعادن) من العوازل إلا أن عليك أن تكون قادرًا على إثبات أن ثابت عزل فلز ما لا نهائى.



شكل 16-17:
يستحث المجال الكهربى شحنات مقيدة على سطح العازل ، وهذه الشحنات هى التى تجعل المجال أقل داخل العازل عنها خارجه .



شكل 17-17:
عندما يستبدل بشريحة العازل فى الشكل 16-17 ، لوح معدنى (فلزى) ، فإن ما يكفى من الشحنات يستحث على سطحى المعدن لكى يخفض المجال داخل المعدن إلى الصفر .

جدول 1-17 :
ثوابت العزل (عند 20°C)

المادة	K
الفراغ	1.00000
الهواء	1.006
البارافين	2.1
زيت البترول	2.2
البنزين	2.29
البولىستيرين	2.6
الثلج (عند −5°C)	2.9
الميكا	6
الأسيتون	27
الكحول الميثيلى	38
الماء	81
الفلزات (المعادن)	∞

17-9 تأثيرات العوازل

يتغير قانون كولوم عندما تغمر الشحنات داخل عازل ؛ ولكى نتعرف على سبب حدوث ذلك علينا الرجوع إلى الشكل 18-17 ؛ حيث نرى كرة شحنتها q مغمورة داخل عازل يمتد لمسافات بعيدة فى جميع الاتجاهات - أو بمعنى آخر - عازل لا نهائى بالضرورة . لاحظ كيف تستحث الكرة شحنة على سطح العازل المجاور لها . وهذه الشحنة المستحثة تلغى فعليًا بعض الشحنة الموجودة على الكرة . وهكذا ينخفض المجال الكهربى داخل العازل من القيمة $E = (kq/r^2)$ التى تنطبق فى حالة الفراغ . ويخفض العازل من قيمة المجال بعامل مقداره $(1/K)$ ، أى أن المجال داخل العازل يكون :

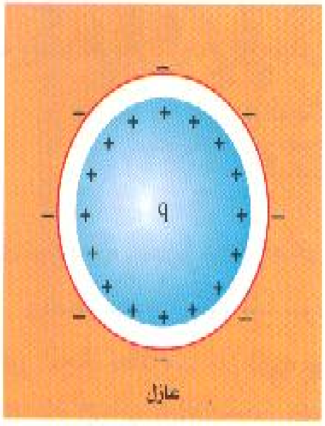
$$E = k\frac{q}{Kr^2} \qquad \text{(شحنة نقطية)} \qquad (17\text{-}10)$$

وهذا هو المجال الكهربى لشحنة نقطية مغمورة داخل عازل .

افترض الآن أن شحنتين هما q_1 و q_2 تفصلهما مسافة مقدارها r قد غمرتا داخل عازل لا نهائى . إن المجال الخاص بالشحنة q_1 عند موقع q_2 يعطى بالمعادلة 10-17 عند وضع q_1 مكان q . ويتسبب هذا المجال فى وجود قوة مقدارها $\mathbf{E}q_2$ تؤثر على q_2 ، وهكذا فإن القوة المؤثرة على q_2 بسبب وجود q_1 هى :

$$F = k\frac{q_1 q_2}{Kr^2} \qquad \text{(قانون كولوم)} \qquad (17\text{-}11)$$

وهذا هو قانون كولوم بالنسبة لشحنات نقطية داخل عازل لا نهائى.



شكل 18-17:
كرة مشحونة داخل عازل لا نهائى . لماذا تنخفض قيمة المجال الكهربى فى وجود العازل ؟

وحيث أن العازل يؤثر بشدة على القوى بين الشحنات ، لذا كانت التفاعلات الكيميائية والبيولوجية شديدة الاعتماد على المذيبات . فأيونان ، مثلاً ، فى محلول ما يؤثران بقوى تتمثل فى المعادلة (11-17) على أحدهما الآخر . والماء له $K = 81$ ولهذا فإن القوة بين الأيونيين تكون أقل كثيرًا فى الماء عنها فى سائل آخر كالبنزين مثلاً ، الذى ثابت عزله $K = 2.3$ نتيجة لهذا فأيونا الصوديوم Na^+ والكلور Cl^- المكونان لكلوريد الصوديوم ، يمكن أن يهربا من بعضهما فى الماء بينما لا يستطيعان ذلك فى البنزين . ومن ثم فإن الماء يذيب NaCl أما البنزين فلا يستطيع . وهناك العديد من المواقف المماثلة فى منظومات كيميائية وبيولوجية حيث يقوم ثابت العزل للمذيب بدور حاسم فى التفاعلات الكيميائية.

إن معظم المكثفات مصنوعة بحيث توجد مادة عازلة بين ألواحها كما ذكر من قبل فى القسم 7-17 . ولا يزيد هذا من متانة هيكلها فحسب وإنما يرفع أيضًا من سعتها ، كما سنرى بعد قليل.

سنبدأ بشحن مكثف متوازى اللوحين بالشحنات $+q$ و $-q$ على اللوحين . وسنفترض أن هناك فراغًا فقط بين اللوحين ، وأن C_{vac} هى سعة المكثف تحت هذه الظروف . وفرق الجهد أو الفولطية بين اللوحين هى $V_{vac} = q/C_{vac}$ دعنا الآن نُدخل شريحة عازل بحيث تملأ الحيز بين اللوحين تمامًا ؛ وحتى لو تلامست أسطح اللوحين مع شريحة العازل فإن الشحنات لا يمكن أن تتحرك عبر الحدود بين المادتين . والمجال بين اللوحين قد انخفض الآن بمقدار $(1/K)$ أى $\mathbf{E} = E_{vac}/K$ وهذا بدوره يخفض فرق الجهد بين اللوحين :

$$V = Ed = \frac{E_{vac}}{K}d = \frac{V_{vac}}{K}$$

ولكن الشحنة الموجودة على اللوحين لا تتغير عند إدخال العازل . ولهذا فإن نسبة الشحنة إلى فرق الجهد أو السعة تكون الآن :

$$C = \frac{q}{V} = \frac{q}{V_{vac}/K} = KC_{vac} \qquad (17\text{-}12)$$

وهكذا فإن نفس اللوحين ، بنفس المسافة التى تفصلهما ، يصبحان قادرين على اختزان المزيد من الشحنة لكل فولت عندما يوجد عازل بينهما .

وهناك وسيلة بسيطة لقياس ثابت العزل لمادة ما وذلك بقياس فرق الجهد عبر اللوحين المشحونين فى الفراغ ثم يعاد القياس بعد ملء الحيز بينهما بالعازل . والنسبة بين هاتين القيمتين لفرق الجهد هى ثابت العزل K :

$$\frac{V_{vac}}{V_{diel}} = K$$

مثال 17-9 :

إذا كانت مساحة السطح فى مكثف متوازى اللوحين هى $20\ cm^2$ وتفصل بين اللوحين مسافة مقدارها 0.4 mm وقد وصل اللوحان ببطارية قوتها الدافعة 120 V . ما مقدار الشحنة التى تسرى إلى اللوحين ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف ترتبط شحنة اللوح بالفولطية ومساحة اللوح والمسافة بين اللوحين ؟

الإجابة : مساحة اللوحين والمسافة التى تفصلهما هى التى تحدد سعة اللوحين (المعادلة 17-9) . وإذا عرفت السعة فإن شحنة اللوح تتحدد من التعريف :

$$C = q/V$$

سؤال : ما هو فرق الجهد (الفولطية) التى يكتسبها اللوحان ؟

الإجابة : ستسرى الشحنة من البطارية إلى أن يصبح فرق الجهد بين اللوحين مساويًا لفولطية البطارية.

الحل والمناقشة : إن مقدار السعة هو:

$$C = \frac{(8.85\times10^{-12}\ C^2/N.m^2)(20\times10^{-4}\ m^2)}{(0.4\times10^{-3}\ m)}$$

$$= 44.3\ pF$$

والشحنة التى ستسرى إلى اللوحين هى

$$q = VC = (120\ V)(44.3\times10^{-12}\ F) = 5.32\times10^{-9}\ C$$

تأكد من استيعابك للوحدات المستخدمة .

مثال 17-10 :

لو أن اللوحين المذكورين فى المثال السابق فصلا عن البطارية ثم غمرا فى الماء ، فأى الكميات C ، V ، q سوف تتغير ؟ وما مقدار التغير ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو تأثير الانفصال عن البطارية ؟

الإجابة : بدون البطارية لن يعود هناك مصدر للشحنة . والشحنة التى وضعت فى الأصل على اللوحين ستظل حبيسة عليهما ، حيث لا تستطيع المغادرة كما لا يمكن أن يضاف المزيد من الشحنات . أى أن q لابد أن تظل هى نفسها .

سؤال : ماذا يحدث لقيمة C عندما يغمر اللوحان ؟

الإجابة : $C_{diel} = K\, C_{vac}$

سؤال : ماذا يحدث لفرق الجهد بين اللوحين ؟

الإجابة : فى غياب البطارية ، فإن فرق الجهد يمكن (بل ويجب) أن يتغير:

$$V_{diel} = \frac{V_{vac}}{K}$$

الحل والمناقشة : ثابت عزل الماء هو $K = 81$ ولذا فإن النتيجة البسيطة التالية ستكون لدينا:

$$C_{diel} = 81\, C_{vac} = (81)(44.3 \times 10^{-12}\ \text{F}) = 3.59\ \text{nF}$$

$$V_{diel} = \frac{120\ \text{V}}{81} = 1.48\ \text{V}$$

وحيث أنك قد قررت أن الشحنة لابد وأن تبقى ثابتة ، فمعنى هذا أن حاصل الضرب $VC\ (=q)$ لابد وأن يبقى ثابتًا . واستقطاب الماء سوف يلغى المجال الواقع بين اللوحين فيما عدا $120/1.48 = 1.2$ فى المائة منه .

مثال 17-11

لو أن اللوحين المذكورين فى المثال 10–17 غمرا فى الماء مع استمرار توصيل البطارية باللوحين ، فكيف يمكن أن تختلف هذه النتائج ؟

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكن أن تتغير الشحنة مع وجود البطارية متصلة ؟

الإجابة : نعم . إن البطارية يمكن أن تكون مصدرًا للشحنات طالما ظلت متصلة.

سؤال : ما هى قيمة الفولطية الواجب تواجدها عندما تظل البطارية متصلة ؟

الإجابة : ستظل البطارية توفر الشحنات للوحين إلى أن يصبح فرق الجهد عبرهما مساويًا لفولطية البطارية : $V_{diel} = V_{vac} = V_{battery}$.

سؤال : وماذا سيحدث للسعة ؟

الإجابة : إن السعة مستقلة عن مقدار الشحنة أو فرق الجهد . إذ إنها خاصية للمواد والأبعاد الهندسية للوحين ، ولهذا سنحصل مرة أخرى على:

$$C_{diel} = K\, C_{vac}$$

الحل والمناقشة : إن المقدار الذى سيجبر على البقاء كما هـو سيكون الفولطيـة 120 V عبر اللوحين . أما C فستزيد حتى تصبح 3.29 nF . والشحنة ستضبط بحيث :

$$q_{\text{diel}} = C_{\text{diel}} V = (3.59 \times 10^{-9}\ \text{F})(120\ \text{V})$$

$$= 4.31 \times 10^{-7}\ \text{C}$$

تذكر أن الشحنـة الأصلية كـانت 5.32 nC ، ولـهذا فـإن كميـة إضافيـة مقدارهـا 4.26×10^{-7} C لابد أن تتوفر بواسطة البطارية التى لا زالت متصلة .

17-10 المكثفات المتصلة معًا على التوالى وعلى التوازى

سنلتقى فى كثير من التطبيقات فيما بعد بالمكثفـات المتصلـة معًا بتنويعـات مختلفـة وسنود أن نعرف مقادير السعات الكلية الفعالة لـهذه التنويعات.

سنقوم أولاً بتوصيل ثلاثة مكثفات ببطارية فولطيتها V كمـا هـو موضـح فـى الشكـل 17-19 (أ) . وهذا ما يطلق عليه التوصيل على التوازى . كيف إذن يتم جمع السعات المنفردة ؟ أو بتعبير آخر ما هى السعة الوحيدة C التـى تكـافئ المجموعـة المتصلـة علـى التوازى ؟

لاحظ أن الألواح الثلاثة إلى اليسار متصلة معًا بواسطة سلك يصل إلى الطرف الموجـب للبطارية ؛ ولـهذا لابد أن تكون الألواح الثلاثة كلـها عند نفس الجهد . وبـالمثل ، فـإن ألواح المكثف إلى اليمين لابد وأن يكون لـها نفس الجهد مثل الطرف السالب للبطاريـة . ونستطيع ، إذن أن نخرج بالنتيجة التالية:

إن الجهد عبر كل المكثفات المتصلة على التوازى لابد أن يكون نفس الجهد .

وفى الحالة الموضحة فى الشكل 17-19 (أ) ، فإن الجهد عبر كل مكثـف V سـيكون هو نفسه فولطية البطارية .

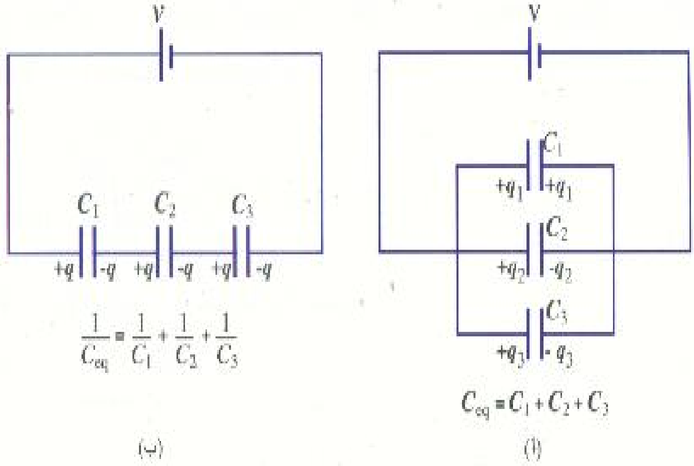
وتعطى شحنة كل مكثف من تعريف السعة .

$$q_1 = C_1 V \qquad q_2 = C_2 V \qquad q_3 = C_3 V$$

والشحنة الكلية على الألواح اليسرى هى . $q_{\text{tot}} = q_1 + q_2 + q_3$ أما الشحنة الكلية علـى الألواح اليمنى فهى نفس الشحنة ولكن بإشـارة سـالبة . والمكثـف الـذى يكـافئ الثلاثـة الموضحة فى الشكل 17-19 سوف يختزن شحنة مقدارها q_{tot} عند فولطية مقدارها V :

$$C_{\text{eq}} = \frac{q_{\text{tot}}}{V} = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{V} = \frac{q_1}{V} + \frac{q_2}{V} + \frac{q_3}{V} = C_1 + C_2 + C_3$$

وقد استعملنا هنا حقيقة أن $\frac{q_1}{V} = C_1$ وبالمثل بالنسبة للمكثفين C_2 و C_3 .



شكل 19-17:
(أ) تكتسب المكثفات المتصلة على التوازى مع فولطية مقدارها V ، شحنات مختلفة ، وإن كانت جميعها تكتسب نفس الفولطية . والسعة المكافئة (الكلية) لهذه المجموعة هى مجموع السعات المنفردة .
(ب) المكثفات المتصلة على التوالى مع فولطية V تكتسب كلها نفس الشحنة . تضاف مقلوبات السعات المنفردة لتعطى مقلوب السعة المكافئة (الكلية) لهذه المجموعة .

ونستطيع أن نعمم هذه النتيجة بالنسبة لعدد n **من المكثفات المتصلة على التوازى .**

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots\ldots + C_n \qquad (17\text{-}13)$$

ويوضح الشكل 19-17 (ب) ثلاثة مكثفات متصلة معًا من أطرافها . ويطلق على هذا النوع من التوصيل اسم **التوصيل على التوالى** . وسنقوم بإيجاد السعة الكلية المكافئة لهذه المجموعة .

عند توصيل هذه المجموعة ببطارية ذات فولطية مقدارها V كما هو موضح فإن اللوح الأيسر للمكثف C_1 سيكون عند نفس جهد الطرف الموجب للبطارية ، والطرف الأيمن للمكثف C_3 سيكون عند نفس جهد الطرف السالب . وعلى هذا تكون الفولطية V هى الجهد عبر المجموعة المتصلة معًا على التوالى بأكملها . ويكتسب اللوحان المذكوران الشحنات $+q$ و $-q$ على الترتيب . وهذا ما يجعل الشحنات $+q$ و $-q$ تستحث على الألواح المتبقية للمكثفات كما هو موضح فى الشكل 19-17 (ب) . ولكى تتأكد من صحة هذا ، لاحظ أنه فى غياب أى اتصال خارجى ، فلن توجد شحنة **صافية** على الألواح الداخلية . واللوح الأيمن للمكثف C_1 واللوح الأيسر للمكثف C_2 يكونان معًا موصلا منفردًا متعادلاً عندما يتصلان . ويقال نفس الشيء عن اللوحين الداخليين الآخرين . أى أن كل ما يمكن للبطارية عمله هو أن **تستحث فصلاً** للشحنات بين هذه الألواح . وعلى هذا نستطيع أن نستخرج النتيجة التالية حول المكثفات المتصلة معًا على التوالى :

يحمل كل مكثف متصل ببطارية ضمن مجموعة من المكثفات المتصلة على التوالى نفس كمية الشحنة .

وحيث أن الشحنات متساوية ، لذا فالمكثفات المنفردة لابد وأن يكون عبرها فولطيات (فروق جهد) مختلفة :

$$V_1 = \frac{q}{C_1} \qquad V_2 = \frac{q}{C_2} \qquad V_3 = \frac{q}{C_3}$$

وعلاوة على ذلك فإن الفولطيات الثلاث تعطى حين تجمع إلى بعضها الفولطية الكلية V :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

والمكثف المنفرد المكافئ سيكتسب الشحنة q من البطارية ذات الفولطية V ومن ثم

$V = q/C_{eq}$. وبمساواة هذين التعبيرين عن V نجد أن

$$V = \frac{q}{C_{eq}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

وعند اختصار المقدار q من طرفى المعادلـة وتعميم النتيجـة علـى عـدد n **من المكثفات المتصلة على التوالى فإن :**

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots\ldots + \frac{1}{C_n} \qquad (17\text{–}14)$$

وبعد أن تجمع المقلوبات ، تذكر أن تقلب المجموع حتى تحصـل علـى C_{eq} . وهـذا هـو الخطأ الوحيد الأكثر شيوعًا فى هذا النوع من الحساب . وفيما يلى اختبار مفيد للإجابة فى حالة التوصيل على التوالى :

لابد وأن تكون C_{eq} أصغر من أي من المكثفات المنفردة فى المجموعة المتصلة معًا على التوالى .

مثال توضيحى 4-17

افترض أن لديك ثلاثة مكثفات $C_1 = 3\,nF$ و $C_2 = 4\,nF$ و $C_3 = 6\,nF$. احسب السـعة المكافئة إذا وصلت هذه المكثفات (أ) على التوازى و (ب) على التوالى .

استدلال منطقى : إن المجموعة المتصلة على التوازى سهلة جدًا :

$$C_{par} = C_1 + C_2 + C_3 = 3\,nF + 4\,nF + 6\,n = 13\,nF$$

أما على التوالى فسوف تجمع المقلوبات :

$$\frac{1}{C_{ser}} = \frac{1}{3nF} + \frac{1}{4nF} + \frac{1}{6nF}$$

أوجد مقامًا مشتركًا وهو 12 nF مثلاً ،

$$\frac{1}{C_{ser}} = \frac{4+3+2}{12nF} = \frac{9}{12nF}$$

لاحظ إنه يجب قلب هذا المقدار :

$$C_{ser} = \frac{12\,nF}{9} = 1.33\,nF$$

وهذه النتيجة هى بالفعل سعة أصغر من أصغر قيمة منفردة أى $(1.33 < 2)$ ■ .

11-17 الطاقة المختزنة فى مكثف مشحون

يختزن المكثف المشحون طاقة وضع كهربية بداخله . ونحن نعرف حقيقة هذا لأن إحدى شحنتيه تكتسب حين تنطلق من أحد لوحيه ، طاقة حركة عند انتقالـها إلى اللوح الآخـر . ونستطيع أن نحصل على مقدار الطاقة المختزنة فى المكثف المشحون وذلك بحساب الشغـل الذى على البطارية بذله لتوصيل الشحنة إلى اللوحين .



إن الطاقة التى يمكن اختزانها فى مكثف كبير مشحون تصبح واضحة بشكل مثير (درامتيكى) عندما يتم توصيل طرفى المكثف (قصرهما) ببعضهما البعض .

سننظر إلى عملية الشحن على أنها تلك التى تكون فيها الشحنة النهائية q قد تمت على هيئة أجزاء صغيرة من الشحنة Δq تم توصيلها إلى اللوحين وعند البداية لم يكن هناك فرق للجهد عبر اللوحين غير المشحونين ولذا تصل الدفعة الأولى من Δq دون بذل أى شغل . أما Δq التالية فتحتاج إلى بذل شغل عليها نظرًا لتكون فولطية $\Delta q/C$ عبر اللوحين . وهكذا فإن الدفعات المتتالية من Δq ستتطلب المزيد من الشغل لأن فرق الجهد يأخذ فى الزيادة باطراد نتيجة تراكم الشحنات على اللوحين . وتحتاج آخر دفعة من Δq إلى شغل مقداره ΔqV ، حيث V هو فرق الجهد النهائى عبر اللوحين المشحونين تمامًا . وهذا يكون الشغل الكلى المبذول مكافئًا لتوصيل الشحنة بأكملها فى وجود القيمة المتوسطة للفولطية (فرق الجهد) خلال عملية الشحن . وهذه القيمة المتوسطة هى $\frac{1}{2}V$ ، ومن ثم تكون الطاقة المختزنة فى مكثف مشحون هى :

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}qV = \frac{\frac{1}{2}q^2}{C} = \frac{1}{2}CV^2 \qquad (17\text{–}15)$$

حيث استخدمنا تعريف السعة $C = q/V$.

17–12 الطاقة المختزنة فى مجال كهربى

لقد عرفنا فى القسم السابق أن الطاقة المختزنة فى مكثف مشحون هى $\frac{1}{2}CV^2$ ، حيث V هى الفولطية الواقعة عبر المكثف الذى سعته C . وعلى الرغم من أنه من غير الضرورى أن نحدد بدقة كيف وأين تختزن هذه الطاقة ، إلا أنه يكون من المناسب أحيانًا أن نفكر فى الأمر على أن الطاقة تختزن فى المجال الكهربى القائم بين لوحى المكثف . وبوجود هذه الخلفية فى الأذهان فقد يكون طيبًا أن نعبر عن معادلة الطاقة المختزنة بدلالة المجال الكهربى E بين اللوحين . ونستطيع عمل هذا عند تذكر أنه بالنسبة للمكثف متوازى اللوحين فإن ، $V = Ed$ ، حيث d هى المسافة التى تفصل بين اللوحين .

وعلى هذا فإن الطاقة المختزنة فى مكثف متوازى اللوحين تصبح :

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}CE^2d^2$$

على أنه من المعادلة (17–7) ، تكون سعة المكثف ذى اللوحين المتوازيين $C = \epsilon_0 A/d$ ، حيث A هى مساحة اللوح ، وذلك عندما يكون هناك فراغ بين اللوحين ؛ أما إذا كان معتلئًا بعازل ذى ثابت عزل مقداره K فإن المعادلة تصبح $C = K\epsilon_0 A/d$.

وبالتعويض عن قيمة C هذه فى معادلة الطاقة نصل إلى :

$$\text{الطاقة} = (\frac{1}{2}K\epsilon_0 E^2)(Ad)$$

يلاحظ أن المقدار (Ad) هو حجم الحيز بين لوحى المكثف ـ أو بتعبير آخر : الحجم الذى يكون فيه المجال الكهربى ثابتًا . عند قسمة طرفى المعادلة على الحجم فإننا

نحصل على تعبير للطاقة فى وحدة الحجوم ، أى الطاقة التى نتصور أنها مختزنة فى وحدة الحجوم من تلك المنطقة التى يكون المجال الكهربى فيها هو E :

(17-16) كثافة الطاقة = الطاقة فى وحدة الحجوم = ($\frac{1}{2} K\epsilon_0 E^2$)

لاحظ أن الطاقة المختزنة فى وحدة الحجوم من الفضاء تتناسب مع مربع شدة المجال الكهربى . ومن المناسب عادة أن نستخدم المعادلة 16-17 عندما ننسب الطاقة إلى مجال كهربى . وعلى الرغم من أن هذا التعبير قد تم اشتقاقه بالنسبة لحالة خاصة جدًا ؛ إلا إنه قد ثبت فى كتب أكثر تقدمًا أن صلاحيته عامة .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) فرق الجهد ، (ب) الفولت ، (جـ) خطوط تساوى الجهد وأسطح وحجوم تساوى الجهد ، (د) القوة الدافعة الكهربية (emf) ، (هـ) الإلكترون فولت ، (و) الجهد المطلق ، (ز) المكثف ، (ح) السعة ، (ط) الفاراد ، (ى) العازل ، (ك) ثنائى القطب ، (ل) التوصيل على التوالى وعلى التوازى .

2 أن تحسب فرق الجهد بين نقطتين عندما تُعطى الشغل المبذول فى حمل شحنة q من نقطة إلى الأخرى (أو العكس) .

3 أن تحسب فرق الجهد بين أى نقطتين فى منطقة يوجد بها مجال كهربى منتظم معروف .

4 أن تخطط متساويات الجهد وخطوط المجال فى مواقف بسيطة .

5 أن تستخدم العلاقة $W = qV_{AB}$ فى مواقف محددة وبسيطة .

6 أن تحسب التغير فى الطاقة بالإلكترون فولت لجسيم معروف الشحنة يتحرك فى فرق جهد معروف . وأن تحول الطاقة من وحدات الإلكترون فولت إلى الجول .

7 أن تحسب الجهد المطلق فى نقطة ما ، الناشئ عن عدة شحنات نقطية محددة موجودة بجوار تلك النقطة .

8 أن تحسب التغير فى طاقة حركة جسيم مشحون بسبب حركته خلال فرق معين للجهد . ولو أعطيت إما مقدار السرعة الابتدائية أو النهائية أن تجد المقدار الآخر .

9 أن تحسب سعة لوحين متوازيين ، وكرة منعزلة باستخدام أبعادها وأن تذكر العلاقة التى تربط بين q ، V ، C .

10 أن تشرح السبب فى أن بعض السوائل أو الجوامد لها ثوابت عزل كبيرة والبعض الآخر له ثوابت عزل صغيرة .

11 أن تحسب الطاقة المختزنة فى مكثف معين مشحون حتى فرق جهد معروف .

12 أن تحسب تأثير العوازل على السعة ، والفولطية ، والمجال الكهربى .

13 أن تحسب السعة المكافئة لمكثفات متصلة على التوازى وأخرى متصلة على التوالى .

14 أن تحسب الطاقة فى وحدة الحجوم فى مجال كهربى .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

وحدة الجهد الكهربى (V)

$$1 \text{ volt (V)} = 1 \text{ J/C}$$

وحدة الإلكترون فولت للطاقة (eV)

$$1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ J$$

وحدة السعة (F)

$$1\ farad\ (F) = 1\ C/V$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

الجهد الكهربى (V) وطاقة الوضع

يعرف الفرق في الجهد الكهربى (الفولطية) بين نقطتين A و B على أنه الفرق فى طاقة وضع شحنة **موجبة** مقسومًا على تلك الشحنة :

$$\Delta V = V_{AB} = V_B - V_A = \frac{PE_B - PE_A}{q}$$

خلاصة :

1 فرق الجهد بين نقطتين فى منطقة بها مجال كهربى ثابت هو ببساطة

$$V_{AB} = Ed$$

حيث d هى المسافة بين A و B مقاسة على **امتداد** E .

2 **يتناقص** الجهد الكهربى فى اتجاه E .

3 وحدة SI البديلة للمجال الكهربى هو volt/meter :

$$1\ N/C = 1\ V/m$$

4 « تسقط » شحنة موجبة حرة من منطقة مرتفعة الجهد إلى أخرى منخفضة الجهد . أما الشحنات السالبة فإنها « تسقط » من مناطق منخفضة الجهد إلى مناطق جهدها أعلى . وفى كلتا الحالتين **تنخفض طاقة** وضع الشحنات الحرة .

5 يكون الشغل المطلوب لتحريك شحنة q خلال فرق للجهد مقداره V_{AB} هو .

$$W = \Delta PE = q\,V_{AB}$$

وتظهر الإشارة الصحيحة للكمية W إذا روعيت الإشارات الصحيحة لكل من q و V_{AB} .

6 تسمى الخطوط أو الأسطح ذات القيمة الثابتة للجهد **متساويات الجهد** . وتكون متساويات الجهد هذه متعامدة فى كل موقع مع خطوط المجال الكهربى .

7 جميع نقط الموصل تكون متساوية الجهد تحت الظروف الكهروستاتيكية .

الجهد المطلق لشحنات نقطية أو كروية .

يعتبر اتخاذ نقطة يكون الجهد فيها صفرًا أمرًا اختياريًا .

وبالنسبة للشحنات ذات التماثل الكروى (بما فى ذلك الشحنات النقطية) يكون اعتبار النقطة التى عندما $V = 0$ حيث $r = \infty$ ملائمًا ، ومن ثم يُعطى الجهد المطلق لمثل هذه الشحنة Q بالعلاقة .

$$V(r) = \frac{kQ}{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

خلاصة :

1 إذا أُعطيت أبعاد وشكل المكثف فإن سعته تحدد مباشرة .

2 تشير القيمة الكبيرة للسعة إلى أن الأداة قادرة على اختزان كميات كبيرة من الشحنة من غير تراكم فولطية (فرق جهد) كبيرة . **أما القيم الصغيرة للسعة فتشير إلى فرق جهد كبير مع وجود كميات صغيرة نسبيًا للشحنات المختزنة .**

3 يعتبر المكثف ذو اللوحين المتوازيين ، مساحة سطح كل منها A وتفصلهما مسافة d هو أكثر المكثفات شيوعًا . وسعة هذا المكثف هي :

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

تكون سعة كرة منعزلة نصف قطرها R هي : $C = 4\pi\epsilon_0 r$

العوازل

غير الوصلات ، المسماة عوازل ، تستطيع تغيير المجال بين لوحى مكثف إذا وجدت بين اللوحين ، بسبب استقطاب جزيئاته . وينشأ عن هذا خفض جزئي لشدة المجال عن القيمة التى كان عليها في الفراغ . والمدى الذى يستطيع العازل أن يخفض إليه المجال يتميز بثابت العزل K لذلك العازل ويعرف بالعلاقة :

$$K = \frac{\text{المجال في الفراغ}}{\text{المجال في العازل}}$$

خلاصة :

1 تكون قيمة K مساوية أو أكبر من الواحد .

2 المواد التي يسهل استقطابها يكون لها عادة قيمًا أكبر لثابت العزل .

3 في كل المعادلات المحتوية على k أو ϵ_0 فإن وجود العازل الذى يملأ الحيز يمكن أخذه في الاعتبار إذا استعملنا k/K أو $K\epsilon_0$ على الترتيب .

4 تتلخص النتائج المذكورة آنفًا في أن V و E ينخفضان في وجود عازل ما بمعامل مقداره $1/K$ ، أما C فإنها تزداد بمعامل مقداره K .

المكثفات المتصلة على التوالى والتوازى

تكون السعة الكلية المكافئة لعدد n من المكثفات المتصلة على التوازى هى :

$$C_{par} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots\ldots + C_n$$

أما السعة الكلية المكافئة لعدد n من المكثفات المتصلة على التوالى هى

$$\frac{1}{C_{ser}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots\ldots + \frac{1}{C_n}$$

خلاصة :

1 كل مكثف في مجموعة متصلة على التوازى يكون له نفس فرق الجهد بين طرفيه ، ويحمل كل مكثف شحنة مختلفة (إلا إذا كانت لها جميعًا نفس السعة C) .

2 يحمل كل مكثف في التوصيل على التوالى نفس الشحنة . ويكون لكل منها فرق جهد مختلف عبر طرفيه (إلا إذا كانت لها جميعًا نفس السعة C) .

3 تذكر في حالة التوصيل على التوالى أن تحصل على المقلوب لإيجاد C_{ser} . وكنوع من الاختبار لابد أن تكون الإجابة أصغر من أقل قيمة للمكثفات المنفردة .

الطاقة المختزنة في مكثف مشحون

الطاقة المختزنة في مكثف سعته C ويحمل شحنة مقدارها q هي

$$\text{الطاقة} = \frac{\frac{1}{2}q^2}{C} = \frac{1}{2}qV = \frac{1}{2}CV^2$$

كثافة الطاقة فى مجال كهربى

تعطى كثافة الطاقة (أى الطاقة فى وحدة الحجوم) والمرتبطة بمنطقة تكون شدة المجال فيها E بالعلاقة :

$$\text{كثافة الطاقة} = \frac{1}{2} K \epsilon_0 E^2$$

حيث K هو ثابت العزل للمادة التى تملأ الحجم .

أسئلة وتخمينات

1 النقطتان A و B عند نفس الجهد . هل يعنى هذا بالضرورة أنه لن يبذل شغل فى حمل شحنة اختبار موجبة من إحدى النقطتين إلى الأخرى ؟ وهل معنى ذلك أنه لن تؤثر أية قوة فى حمل الشحنة من النقطة A إلى الأخرى B ؟ اشرح .

2 هل يمكن أن يتقاطع سطحا تساوى الجهد ؟ اشرح .

3 يكون الجهد المطلق عند منتصف المسافة بين شحنتين نقطيتين متساويتين فى المقدار ومتضادتين فى الإشارة صفرًا . هل يمكنك أن تجد مسارًا واضحًا لا يبذل فيه شغل عند نقل شحنة اختبار موجبة خلاله من اللانهاية إلى هذه النقطة ؟ اشرح .

4 إذا بدأنا من حقيقة أن قطعة من فلز ما تعتبر جسم تساوى الجهد تحت ظروف كهروستاتيكية . فإثبت أن المجال الكهربى داخل قطعة مجوفة من الفلز صفر .

5 لو كان الجهد المطلق فى نقطة ما صفرًا ، فهل معنى ذلك أن المجال الكهربى هناك هو الآخر صفر ؟

6 ماذا عن المجال الكهربى فى منطقة يكون الجهد المطلق فيها ثابتًا ؟

7 إثبت أن جميع نقط جسم فلزى (معدنى) تكون عند نفس الجهد تحت ظروف كهروستاتيكية . وهل ينطبق هذا أيضًا داخل فجوة فى باطن الجسم ؟ وهل يغير من الأمر شيئًا لو علقت شحنة فى الفجوة ؟

8 مكثف متوازى اللوحين توجد على لوحيه شحنة مثبتة q . ثم جذب اللوحان بعيدًا عن بعضهما البعض . ولابد لمن يجذب أن يبذل شغلاً . لماذا ؟ وهل يتغير فرق الجهد أثناء هذه العملية وماذا يحدث للشغل المبذول من جانب من يجذب ؟

9 كرة فلزية مجوفة ومشحونة بانتظام بشحنة مقدارها $+q$. أين تقع هذه الشحنة ؟ هل يكون الجهد المطلق داخل الكرة صفرًا ؟ أم هل يكون ثابتًا ؟ وما هو ؟ أعد بالنسبة لشحنة مقدارها $-q$.

10 كثيرًا ما تستخدم طرق كهروستاتيكية فى الصناعة لدهان الأجسام المعدنية بالرش ؛ حيث يوصل الرشاش بأحد طرفى مصدر جهد عال ، بينما يتصل الجسم المعدنى المطلوب دهانه بالطرف الآخر . اشرح فكرة عمل هذه الطريقة . ولماذا تولد هذه الطريقة تلوثًا أقل للهواء كما تستهلك دهانًا أقل من الطرق التقليدية ؟

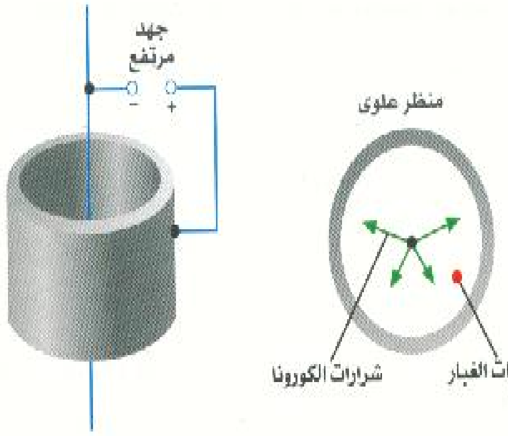
11 كرتان فلزيتان متطابقتان وتحملان شحنات $+q$ و $-2q$. وقد تلامست الكرتان ثم انفصلتا مرة ثانية . ما هى شحناتهما النهائية ؟ وإذا كان نصفا قطرى الكرتين مختلفين فأى الكرتين سيكون لها الشحنة النهائية الأكبر ؟

12 تبلغ الشدة الكهربية للهواء نحو 30,000 V/cm وهذا يعنى انه إذا زادت شدة المجال الكهربى عن هذه القيمة فإن شرارة ستقفز خلال الهواء ، وعندئذ يقال إنه حدث « انهيار كهربى » . استخدم هذه القيمة لحساب فرق الجهد بين جسمين حيث تحدث الشرارة . ومن المواقف المعتاد أن تقفز فيها شرارة بين جسدك ومقبض باب معدنى بعد أن تكون قد سرت على سجادة عميقة الوبر أو انزلقت من على مقعد سيارة بلاستيكى حين يكون الجو جافًا جدًا .

13 ارجع إلى البيانات الواردة فى السؤال السابق لتحسب مقدار الشحنة التى يمكن وضعها فوق كرة معدنية قطرها 50 cm .

14 يوضح الشكل م 1–17 مرسِّب كهروستاتيكى بسيط يستخدم لإزالة الدخان من الهواء . وتركيبه كما هو بالشكل ، حيث يمتد سلك دقيق جدًا بطول محور أنبوبة معدنية كبيرة ، ثم يطبق فرق جهد مرتفع بين هذين العنصرين بحيث يتصل السلك بالطرف السالب . فإذا كان السلك رفيعًا جدًا وفرق الجهد كبيرًا فإن المجال الكهربى بالقرب من السلك سيكون مرتفعًا جدًا .

لماذا ؟ وستتكون شرارات ضئيلة (تسمى الكورونا) بالقرب من السلك بسبب حدوث انهيار كهربى (انظر السؤال رقم 12) ، وتُقذف الإلكترونات مبتعدة عن السلك . لماذا ؟ وتقوم هذه الإلكترونات بشحن حبيبات الدخان بشحنة سالبة . كيف ؟ وتندفع هذه الحبيبات نحو الأنبوبة وتترسب هناك . لماذا ؟ ونتيجة لهذا تتم إزالة الدخان من الهواء .



شكل م 1-17

مسائل

الأقسام من 1-17 إلى 4-17

1 ما مقدار الشغل الواجب بذله لحمل شحنة مقدارها $+6.0\,\mu C$ من الطرف السالب لبطارية قوتها 9.0 V إلى الطرف الموجب ؟ وكم لنقلها من الطرف الموجب إلى الطرف السالب ؟

2 ما مقدار الشغل الواجب بذله لنقل إلكترون من الطرف الموجب إلى الطرف السالب لبطارية قوتها 3.0 V ؟ أعد المسألة بالنسبة لبروتون .

3 وصل لوحان معدنيان متوازيان تفصلهما مسافة مقدارها 0.6 mm بطرفى بطارية قوتها 1.5 V . (أ) ما هى شدة المجال الكهربى بين اللوحين ؟ (ب) ما مقدار القوة التى قد يتأثر بها إلكترون موجود بين اللوحين .

4 كانت شدة المجال الكهربى بين لوحين معدنيين متوازيين تفصلهما مسافة مقدارها 0.3 mm هى 3000 V/m . (أ) ما هو فرق الجهد بين اللوحين ؟ (ب) ما مقدار القوة التى يتأثر بها بروتون موجود بين اللوحين ؟

5 ما مقدار الشغل المطلوب لتحريك عدد أفوجادرو من الإلكترونات بين نقطتين حيث يبلغ فرق الجهد 24 V ؟

■ 6 النقطتان A و B موجودتان على المحور x وبينهما مسافة مقدارها 40 cm وتقعان فى منطقة بها مجال كهربى ثابت E وفرق الجهد بها 60 V ، مع العلم بأن جهد النقطة A هو الأكبر . (أ) أوجد E_x ، أى المجال الكهربى الثابت فى الاتجاه x فى نفس المنطقة . (ب) أعد الحسابات لو أن النقطة B هى التى جهدها أعلى .

■ 7 فى منطقة ما من الفضاء كان المجال الكهربى موجهًا باتجاه المحور z الموجب وكان مقداره 4000 V/m . أوجد فرق الجهد بين نقطة الأصل والنقط التى إحداثياتها (x, y, z) كما يلى معبرًا عنها بالمتر : (أ) (0, 0, 8) ، (ب) (16, 0, 0) ؛ (جـ) (0, 0, -10) ؛ (د) (-12, 10, 12) .

8 ما مقدار الشغل المبذول عند تحرك بروتون مسافة مقدارها 4 cm بامتداد مجال كهربى منتظم شدته 250 N/C ؟

■ 9 أطلق إلكترون عند نقطة أصل الإحداثيات فى منطقة بها مجال كهربى شدته 2800 V/m ويتجه باتجاه المحور y الموجب . (أ) أوجد الوقت الذى يستغرقه إلكترون حتى يصل مقدار سرعته إلى 7.2×10^6 m/s . (ب) ما هى المسافة التى يقطعها الإلكترون خلال هذه الفترة ؟

10 يتحرك بروتون على امتداد المحور x الموجب بسرعة مقدارها 6.0×10^5 m/s . ثم طبق مجال كهربى بحيث كانت $E_x = -500$ V/m ، $E_y = E_z = 0$. (أ) ما هو مقدار سرعة البروتون بعد أن ينتقل مسافة مقدارها 3 m ؟ (ب) كم من الوقت يستغرقه البروتون ليصل إلى هذه النقطة ؟

11 أنطلق بروتون من السكون وتسارع خلال فرق للجهد مقداره 60 V . ما هو مقدار السرعة النهائيـة للبروتون ؟ أعد المسألة بالنسبة لإلكترون .

12 ما مقدار فرق الجهد الذى على جسيم ألفا الحركة خلاله إذا أريد له أن يتسارع من السكون إلى سرعة تصل إلى 10^5 m/s ؟ (كتلة جسيم ألفا هى $m_\alpha = 4 \times 1.66 \times 10^{-27}$ kg أما شحنته فهى $q_\alpha = 2e$) .

13 يبلغ فرق الجهد بين لوحى التسارع فى جهاز تليفزيون نحو 25,000 V . فإذا كانت المسافة بين اللوحين هى 1.5 cm . فما هو المجال الكهربى المنتظم بين اللوحين ؟

14 قذف إلكترون من لوح معدنى كبير نحو لوح آخر موازٍ له . فإذا كانت السرعة الابتدائية للإلكترون هى 6×10^6 m/s وكان مقدار سرعته قبل أن يضرب اللوح الثانى مباشرة هو 4×10^6 m/s ، فكم يكون فرق الجهد بين اللوحين ؟ وهل اللوح الثانى عند جهد أعلى أم أدنى من جهد اللوح الأول ؟

15 قذف بروتون بسرعة مقدارها v_0 من لوح معدنى نحو لوح ثانٍ موازٍ للأول . فإذا كان هناك فرق للجهد مقداره V بين اللوحين ، فما هو مقدار سرعة البروتون قبل أن يضرب اللوح الثانى مباشرة . هل هذه الإجابة فريدة ؟ إن لم تكن ، فعليك إيجاد الإجابات الأخرى الممكنة .

القسم 5-17

16 (أ) ما هو مقدار سرعة بروتون طاقته 2.4 keV ؟ (ب) ما هو مقدار سرعة إلكترون طاقته 0.2 keV ؟

17 ما مقدار فرق الجهد اللازم لإيقاف إلكترون يتحرك بسرعة ابتدائية مقدارها 5.0×10^5 m/s ؟

18 تبلغ طاقة حركة جسيم ألفا (كتلته $m_\alpha = 4 \times 1.66 \times 10^{-27}$ kg وشحنته $q_\alpha = 2e$) 7.2 MeV . (أ) ما مقدار الطاقة بوحدات جول ؟ (ب) ما مقدار سرعة الجسيم ؟ (جـ) ما مقدار فرق الجهد الذى على الجسيم الحركة خلاله حتى يصل إلى هذه الطاقة ؟

19 يتسارع أيون ليثيوم ثلاثى التأين (كتلته $m_\alpha = 6.94 \times 1.66 \times 10^{-27}$ kg وشحنته $q_\alpha = 3e$) خلال فرق للجهد مقداره 7200 V . ما هى قيمة طاقة الحركة بوحدات الإلكترون فولت ؟ ما مقدار سرعة الأيون ؟

20 يُسرَّع أيون خلال فرق للجهد مقداره 417 V حتى صارت طاقة حركته 2.0×10^{-16} J . ما هى شحنة الأيون ؟

21 تتسارع البروتونات فى معجل (مسارع) فان دى جراف فى أحد معامل الأبحاث من السكون خلال فرق للجهد مقداره 250,000 V . (أ) ما هو مقدار طاقة حركة البروتونات بوحدات الإلكترون فولت ؟ وما هى طاقة حركة البروتونات بوحدات جول ؟ (جـ) ما مقدار سرعة البروتونات ؟

22 يبلغ فرق الجهد بين لوحين متوازيين 80 V . (أ) قذف بروتون من اللوح السالب نحو اللوح الموجب بطاقة حركة ابتدائية مقدارها 100 eV . ما هو مقدار طاقة حركة البروتون قبل أن يضرب اللوح الموجب مباشرة ؟ (ب) أعد المسألة إذا قذف البروتون من اللوح الموجب نحو اللوح السالب .

23 ما مقدار الطاقة التى يكتسبها جسيم مشحون بشحنة مقدارها 60 μC عندما يُعجَّل خلال فرق للجهد مقداره 100 V ؟

24 يُعجَّل (يسارع) إلكترون يتحرك بسرعة مقدارها 4.0×10^6 m/s خلال فرق للجهد مقداره 30 V . ما هو مقدار السرعة الجديدة للإلكترون ؟

25 تتناقص السرعة الابتدائية لبروتون والتى مقدارها 6.0×10^7 m/s حتى تصير سرعته النهائية 4.0×10^7 m/s ما مقدار فرق

الجهد الذى لزم أن يتحرك فيه البروتون حتى تتناقص سرعته على هذا النحو ؟

26 قذف بروتون بطاقة حركة تبلغ 4800 eV من لوح سالب نحو لوح موجب . وكان فرق الجهد بين اللوحين 2000 V . (أ) ما مقدار طاقة الحركة (بالإلكترون فولت) التى يفقدها البروتون عند تحركه نحو اللوح الموجب ؟ (ب) ما مقدار طاقة حركته (بالإلكترون فولت) قبل أن يضرب اللوح مباشرة ؟ (جـ) أعد الحسابات بالنسبة لجسيم ألفا له نفس طاقة الحركة الابتدائية . (شحنة جسيم ألفا ، وهو طبعًا نواة الهليوم ، هى 2e) .

القسم 17-6

27 ما هو الجهد المطلق عند نقطة تبعد مسافة 3.2×10^{-14} m من نواة ذرية إذا كانت شحنة النواة هى $76\,e$ ؟ إهمل وجود الإلكترونات فى الذرة . ولو أن بروتونا أطلق من هذه النقطة فكم ستكون طاقة حركته (بملايين الإلكترون فولت) عندما يصير بعيدًا عن النواة ؟

28 ما هى المسافة التى تبعد بها نقطة عن شحنة مقدارها $-8\,\mu$C ليكون الجهد الكهربى عند تلك النقطة -2.3×10^4 V ؟

29 يدور الإلكترون فى نموذج بوهر لذرة الهيدروجين حول البروتون فى مدار نصف قطره 0.51×10^{-10} m .

30 وضعت شحنتان نقطيتان على المحور x : شحنة مقدارها $+6.0\,\mu$C عند نقطة أصل الإحداثيات والأخرى $-5.0\,\mu$C عند $x = 16.0$ cm . أوجد الجهد المطلق الناشئ عن هاتين الشحنتين عند (أ) $x = 12$ cm و (ب) $x = -6$ cm .

31 وضعت أربع شحنات متساوية ، كل منها $-5.0\,\mu$C عند الأركان الأربعة لمربع طول ضلعه 40 cm . ما هو الجهد المطلق عند مركز المربع ؟

32 أعد المسألة السابق 31 لو كانت إحدى الشحنات الأربع موجبة .

■ 33 وضعت شحنة مقدارها -4.0×10^{-9} C عند نقطة أصل الإحداثيات ، ووضعت شحنة أخرى مقدارها 6.0×10^{-9} C ، عند $x = 2.4$ m . حدد موقعين على المحور x يكون فيهما الجهد الكهربى لهاتين الشحنتين صفرًا .

34 وضعت شحنة مقدارها $6.0\,\mu$C عند النقطة (0, 1.0) حيث كانت وحدات الإحداثيات بالمتر . ثم وضعت شحنة أخرى مقدارها $-4.0\,\mu$C عند (-3.0, 0) . أوجد الجهد المطلق الناشئ عن هاتين الشحنتين عند (أ) (-3.0, 0) ، (ب) (1.0, 0) .

■ 35 الشحنتان النقطيتان $q_1 = -5$ nC و $q_2 = 4$ nC تفصلهما مسافة مقدارها 40 cm . ما هو الجهد المطلق (أ) عند نقطة تقع على منتصف المسافة بين الشحنتين و (ب) عند نقطة على بعد 40 cm من كل من الشحنتين ؟

■ 36 كرة معدنية نصف قطرها 30 cm تحمل شحنة منتظمة مقدارها 8.0×10^{-9} C . وإذا اعتبرنا هذه الكرة بعيدة عن جميع الأجسام الأخرى فكم يكون مقدار الجهد المطلق عند سطحها ؟

القسم 17-7

37 عندما تكون ألواح أحد مكثفات جهاز راديو مشحونة بشحنة مقدارها $1.8\,\mu$C فإن فرق الجهد بينها يكون 9.0 V . ما مقدار سعة ذلك المكثف ؟

38 ما مقدار الشحنة على مكثف سعته 36 nF ويقع تحت فرق جهد مقداره 840 V ؟

■ 39 تزداد الشحنة على ألواح مكثف بمقدار $24.0\,\mu$C عندما يرتفع فرق الجهد بينها من 18.0 إلى 34.0 . ما مقدار السعة ؟

40 تبلغ المسافة بين لوحى مكثف متوازى اللوحين 0.05 mm وكانت سعة المكثف $0.4\,\mu$C . ما هى مساحة كل من لوحى المكثف ، إذا كان الحيز بينهما فراغًا ؟

■ 41 مساحة كل لوح من لوحى مكثف متوازى اللوحين $280\ \text{cm}^2$ وتفصلهما مسافة مقدارها 0.5 mm . ما هو مقدار المجال الكهربى بين اللوحين عندما تكون شحنة المكثف $1.0\,\mu$C ؟

42 لو أن الفجوة بين لوحى مكثف متوازى اللوحين نصفت بينما تضاعفت مساحة اللوح ثلاث مرات ، فكم تكون النسبة بين

السعة الجديدة إلى السعة الأصلية للمكثف ؟

43 وضع لوحان متماثلان بحيث يتوازيان وتفصلهما مسافة مقدارها 0.05 mm . وقد كانت مساحة كل منهما $360\ cm^2$. (أ) أوجد سعة المجموعة لو وجد فراغ بين اللوحين . (ب) ما مقدار الشحنة المختزنة بالمكثف عندما يتصل ببطارية قوتها 9.0 V ؟

القسمان 8-17 و 9-18

44 أعد الجزءين (أ) و (ب) فى المسالة رقم (43) لو ملئ الحيز بين اللوحين بمادة بلاستيكية ثابت عزلها $K = 4.0$.

45 كم يجب أن تكون مساحة اللوح فى مكثف سعته $12\ \mu C$ إذا كان هناك غشاء من أكسيد الألومنيوم سمكه 20 nm يملأ الفجوة بين لوحيه المتوازيين ؟ اعتبر $K = 8$ بالنسبة لأكسيد الألومنيوم .

46 تحدث شرارة في الهواء إذا زادت شدة المجال الكهربى عن نحو 3.0×10^6 V/m . ما مقدار الشحنة التى توضع على مكثف متوازى اللوحين سعته 30 pF ويوجد هواء بين لوحيه قبل أن تحدث الشرارة ؟ اعتبر مساحة كل من اللوحين $30\ cm^2$.

47 مكثف هوائى متوازى اللوحين يحمل شحنة مقدارها 28 nC عندما يكون تحت فرق للجهد مقداره V_0 . وعندما يمتلئ الحيز بين اللوحين بسائل ما ، فإن الشحنة تزداد حتى تبلغ 48 nC فى حين يظل فرق الجهد ثابتا عند V_0 . ما هو ثابت العزل للسائل ؟

48 شحن مكثف هوائى متوازى اللوحين إلى أن أصبح فرق الجهد بين لوحيه 120 V ثم فصل عن البطارية . وعندما ملئ الحيز بين اللوحين تمامًا بقطعة من الزجاج فإن فرق الجهد عبر المكثف هبط إلى 30 V . ما هو ثابت عزل الزجاج ؟

القسم 10-17

49 وُصِّل مكثفان ، $C_1 = 6\ \mu C$ و $C_2 = 12\ \mu C$ على التوازى ، ثم وُصِّلت المجموعة ببطارية قوتها 9.0 V . (أ) ما هى السعة المكافئة للمجموعة ؟ (ب) ما هو فرق الجهد عبر كل من المكثفين ؟ (جـ) ما هى الشحنة المختزنة فى كل من المكثفين ؟

50 وُصِّل المكثفان المذكوران فى المسألة السابقة على التوالى مع بطارية قوتها 9.0 V . أوجد (أ) السعة المكافئة للمجموعة ، (ب) فرق الجهد عبر كل مكثف و (جـ) الشحنة على كل مكثف .

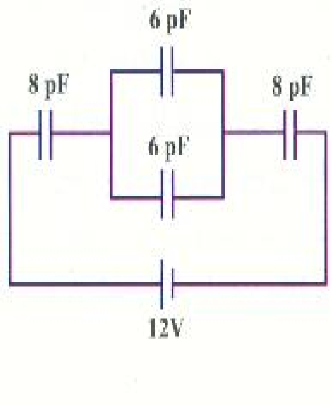
51 وصلت ثلاث مكثفات هى $C_1 = 40$ pF ، $C_2 = 60$ pF ، $C_3 = 120$ pF معًا . (أ) أوجد السعة المكافئة للمجموعة إذا كان التوصيل على التوازى ، (ب) ما هى السعة المكافئة إذا كان التوصيل على التوالى ؟

52 وصلت المجموعة المذكورة فى المسألة 51 ببطارية قوتها 9.0 V . أوجد الشحنة على كل مكثف وفرق الجهد عبره عندما يكون التوصيل (أ) على التوالى ، (ب) على التوازى .

53 دائرة كهربية متصلة على التوالى وتضم مكثفًا سعته $0.5\ \mu C$ ومكثفًا سعته 40 pF وبطارية قوتها 120 V . أوجد الشحنة على كل من المكثفين . وما مقدار الشحنة على كل من المكثفين إذا وصلا على التوازى عبر البطارية ؟

54 كم قيمة للسعة يمكن الحصول عليها عند توصيل المكثفات التالية بطرق مختلفة : $4\ \mu F$ ، $8\ \mu F$ ، $16\ \mu F$ ؟ وما هى هذه القيم ؟

55 وصلت أربع مكثفات بالطريقة المبينة فى الشكل م 2-17 أوجد (أ) السعة المكافئة للمجموعة و (ب) الشحنة على كل مكثف وفرق الجهد عبره .



شكل م 2-17

القسمان 11-17 و 12-17

56 مكثف متصل ببطارية قوتها 120 V ويختزن شحنة مقدارها 45 μ C . (أ) ما هى سعة ذلك الكثف ؟ (ب) ما مقدار الطاقة التى يختزنها المكثف ؟

57 شحن مكثف متوازى اللوحين ثم فصل عن البطارية . كيف تتغير الطاقة المختزنة فى المكثف إذا ضوعفت المسافة بين اللوحين ؟

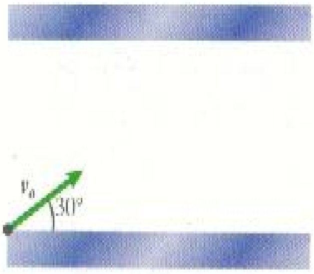
■ 58 أوجد الطاقة المختزنة فى كل من المكثفات الموضحة فى الشكل م 2-17 .

59 مكثف متوازى اللوحين تبلغ مساحة كل من لوحيه 4 cm^2 وتفصلهما مسافة مقدارها 0.5 mm . ملئ الحيز بين اللوحين بمادة ثابت عزلها $K = 8$. فإذا وُصلت بطارية قوتها 12 V بالمكثف فكم من الطاقة سوف يختزن ؟ ما هو العامل الذى سيتغير به مقدار الشحنة المختزنة إذا أزيل العازل وملئ الحيز بين اللوحين بالهواء بينما ظلت البطارية متصلة بالمكثف ؟

مسائل إضافية

■ 60 علقت كرة صغيرة تحمل شحنة مقدارها 30 nC+ بواسطة خيط بين لوحين أفقيين متوازيين تفصلهما مسافة مقدارها 40 cm . (أ) عندما يكون فرق الجهد بين اللوحين 6000 V فإن الشد فى الخيط يكون صفرًا ، فما هى كتلة الكرة ؟ (ب) ما مقدار الشد فى الخيط عندما تعكس قطبية اللوحين ؟

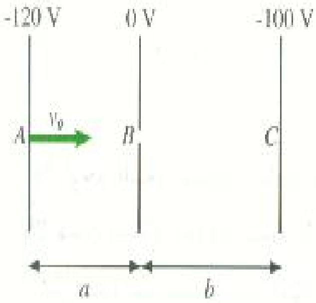
■■ 61 تفصل مسافة مقدارها 5.0 cm بين لوحين متوازيين رأسيين وفرق الجهد بينهما 8000 V ، وعلقت كرة صغيرة (كتلتها $m = 2 \times 10^{-4}$ g) مثل البندول بين اللوحين . ويستقر الخيط الرفيع الذى لا كتلة له ويمسك الكرة إلى وضع الاتزان عندما يصنع زاوية مقدارها °15 مع الرأسى . أوجد الشحنة التى على الكرة .



شكل م 3-17

■■ 62 قذف بروتون من اللوح السفلى الموضح فى الشكل م 3-17 بسرعة $v_0 = 4 \times 10^4$ m/s بالزاوية المبينة فى الشكل . ما هو مقدار فرق الجهد اللازم وجوده بين اللوحين لو كان على البروتون مجرد ألا يضرب اللوح العلوى ؟

■ 63 قذف إلكترون من اللوح السفلى المبين فى الشكل م 3-17 بالزاوية المبينة ، وكان فرق الجهد بين اللوحين 3000 V . كم يجب أن يكون مقدار السرعة الابتدائية للإلكترون لو كان عليه مجرد ألا يضرب اللوح العلوى ؟ وهل يجب أن يكون اللوح العلوى موجبًا أم سالبًا ؟



شكل م 4-17

■ 64 قذف إلكترون من اللوح A ، الموضح فى الشكل م 4-17 ، نحو لوح آخر B مواز له بسرعة ابتدائية $v_0 = 4.0 \times 10^6$ m/s . وكانت الألواح A ، B و C عند الجهود 120 V- ، 0 V ، 100 V- على الترتيب . فإذا فرضنا أن الإلكترونات تنتقل بحيث تكون متعامدة على الألواح فكم سيكون مقدار سرعتها قبل أن تضرب اللوح C مباشرة ؟ اعتبر $a = 8.0$ cm و $b = 10.0$ cm .

■ 65 تقع شحنة نقطية مقدارها 10.0 μ C عند نقطة أصل الإحداثيات . ما مقدار الشغل المطلوب بذله لإحضار شحنة موجبة مقدارها 3.0 μ C من مالانهاية إلى الوضع $x = 20.0$ cm ؟

66 وضعت شحنة اختبار $q_1 = 0.2\ \mu C$ على المحور y وعلى مسافة $+4.0\ cm$ بعيدًا عن شحنة مثبتة $q_2 = 20.0\ \mu C$ موضوعة عند نقطة أصل الإحداثيات . ثم حركت شحنة الاختبار q_1 لمسافة $8.0\ cm$ على امتداد المحور y ، ثم حركت لمسافة $9.0\ cm$ موازية للمحور x وبعيدًا فى المرتين عن الشحنة المثبتة . ما هو التغير فى طاقة الوضع الكهربية لشحنة الاختبار q_1 ؟

67 علقت كرة معدنية صغيرة نصف قطرها $3.0\ cm$ بواسطة خيط رفيع عند مركز غرفة كبيرًا جدًا . وكانت الكرة تحمل شحنة مقدارها $-6 \times 10^{-8}\ C$. ما هو فرق الجهد التقريبى بين الكرة وجدران الغرفة ؟

68 كيف يمكن توصيل أربعة مكثفات سعة كل منها $3\ \mu F$ لكى تكون سعة المجموعة الكلية هى (أ) $12\ \mu F$ ، (ب) $3\ \mu F$ ، (جـ) $1.2\ \mu F$ ، (د) $1.5\ \mu F$ ؟

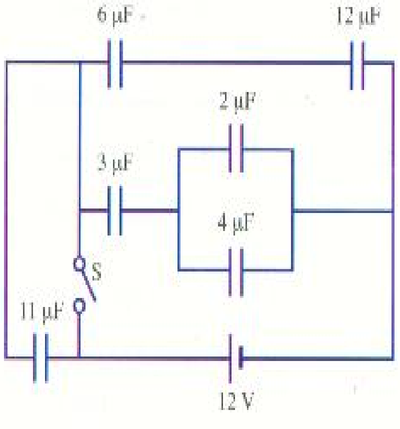
69 شحن مكثف سعته $1.0\ \mu F$ وذلك بتوصيله ببطارية قوتها $12\ V$. ثم فصل المكثف عن البطارية ووصل بمكثف غير مشحون وسعته $3.0\ \mu F$. ما مقدار الشحنة على كل من المكثفين ؟ وما مقدار فرق الجهد عبر كل منهما ؟

70 مكثف متوازى اللوحين يمكن تغيير المسافة بين لوحيه دون إحداث اضطراب بالمنظومة الكهربية . فإذا كانت الفجوة فى الوضع A فإن السعة تكون $40\ pF$ وعندما تكون فى الوضع B تصبح السعة $36\ pF$. وقد شحن المكثف بواسطة بطارية قوتها $9.0\ V$ عندما كانت الفجوة فى الوضع A . ثم نزعت البطارية وتغير وضع الفجوة إلى B دون أن تتغير الشحنة عليه . (أ) ما مقدار الشحنة على المكثف عندما تكون الفجوة فى الوضع A ؟ (ب) ما مقدار فرق الجهد عبر المكثف عندما تكون الفجوة فى الوضع B ؟(جـ) ما مقدار التغير فى الطاقة المختزنة عندما تتغير الفجوة من الوضع A إلى الوضع B ؟ (د) ما هو الحد الأدنى من الشغل الذى يبذله شخص يمسك باللوحين ليغير المكثف من وضع الفجوة A إلى وضع الفجوة B ؟

71 أعد المسألة 70 لو تركت البطارية متصلة إلى اللوحين أثناء تغير المكثف من وضع الفجوة A إلى الفجوة B .

72 بندول طوله L يتعلق من سقف غرفة بها مجال كهربى يتجه إلى أسفل وكانت كتلة كرة البندول هى m وتحمل شحنة مقدارها q . أوجد تردد البندول عند حدوث اهتزازات ذات زوايا صغيرة .

73 أوجد السعة المكافئة للمجموعة الموضحة بالشكل م 5-17 عندما يفتح المفتاح S .



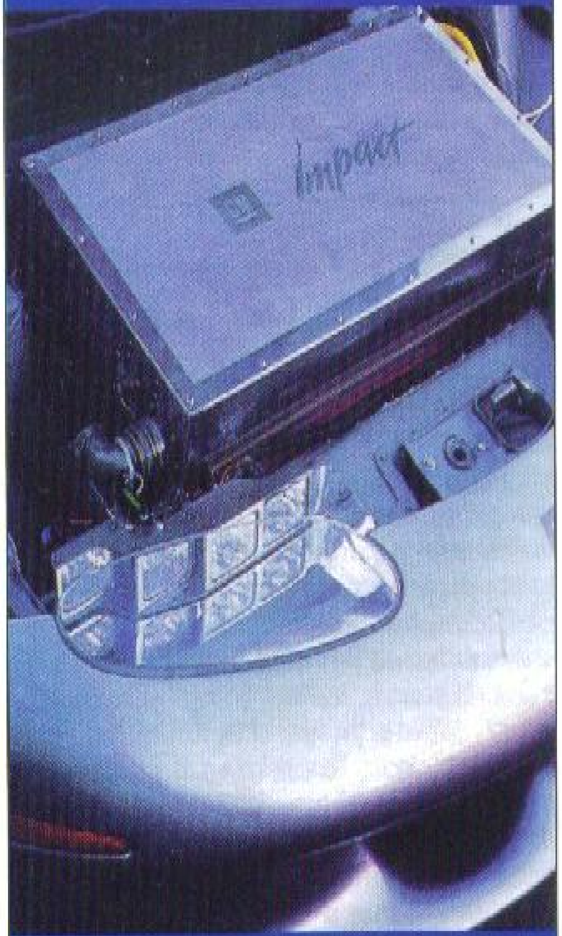
شكل م 5-17

74 أوجد السعة المكافئة للمجموعة الموضحة بالشكل م 5-17 عند غلق المفتاح S .

75 شحن مكثفان أحدهما سعته $4\ \mu F$ والآخر سعته $6\ \mu F$ على انفراد حتى فرق جهد مقداره $100\ V$ وذلك بتوصيلهما كل على حدة عبر بطارية . وبعد أن فصلا عن البطارية وصل الطرف الموجب لأحدهما باللوح الموجب للآخر واللوح السالب لأحدهما باللوح السالب للآخر . أوجد (أ) الجهد عبر كل من المكثفين ؛ (ب) الشحنة النهائية على كل من المكثفين .
تلميح : بعد فصل المكثفين يكون فرق الجهد عبر كل منهما هو نفسه .

76 أعد المسألة 75 ولكن عند توصيل اللوح الموجب لأحد المكثفين باللوح السالب للمكثف الآخر .

الفصل الثامن عشر

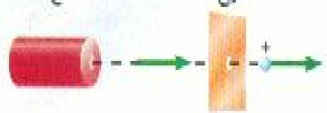


دوائر التيار المستمر

درسنا فى الفصلين السابقين خواص الشحنات الكهربية الساكنة على أن معظم التطبيقات العملية للكهرباء تنطوى على شحنا تتحرك ، أو بعبارة أخرى على تيارات كهربية . فالشحنا المتدفقة خلال ملفات محرك كهربائى ، مثلاً ، هى التى تدف عمود الحركة إلى الدوران . وتشع المصابيح الكهربية الضوء بسبب مرور الشحنات فى فتيلاتها . وعندما تدير مفتاح الراديو أ التليفزيون فإنه يبدأ فى العمل لأن شحنات تسرى خلا دوائرهما . وعلى الرغم من كون معظم الأجهزة الشائعة فى الصناعة وفى المنازل تعمل بالتيار المتردد (ac) الذى يسرى فى دوائرها ، حيث تتدفق الشحنات جيئة وذهابًا خلا الوصلات ، إلا أننا سنبدأ دراستنا للشحنات المتحركة بمناقشة الأبسط أولاً وهى حالة دوائر التيار المستمر (dc) ، حيد تسرى الشحنات خلال الموصِّل دون أن تعكس اتجاه حركتها . والسيارة التى تدار بالكهرباء (فى الصورة العليا) مثال على استخدام دوائر التيار المستمر .

18-1 التيار الكهربى

سنبدأ مناقشتنا للشحنات المتحركة بتعريف كمية يطلق عليها التيار الكهربى . افترض أن لدينا جهازًا يطلق عليه مدفع **شحنات** ، وهو قادر على قذف تيار من الجسيمات المشحونة كالأيونات أو الإلكترونات (يستخدم فى أجهزة التليفزيون مثل هذه الأداة لقذف حزمة من الإلكترونات على الشاشة) وبالنسبة لدراستنا ، افترض مدفعًا يقذف بحزمة من الجسيمات المشحونة خلال ثقب فى لوح كما فى الشكل 1-18 .



شكل 1–18:
تمر حزمة من الشحنات المتحركة خلال ثقب فى اللوح . فإذا مرت شحنة مقدارها Δq من خلال الثقب فى زمن مقداره Δt ، فإن التيار يكون $\Delta q/\Delta t$.

وتشكل هذه الحزمة المارة خلال الثقب فيضًا من الشحنات ، والذى نرجوا الآن أن نصف مقداره . وسنفعل ذلك بتعريف كمية سنطلق عليها **التيار الكهربى** وسنرمز له بالرمز I :

فى فترة زمنية مقدارها Δt فإن الحزمة تحمل شحنة مقدارها Δq عبر نقطة معينة (كالثقب الموجود فى اللوح فى هذه الحالة) ، والتيار الذى تحمله هذه الحزمة يكون عندئذ :

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad (18\text{–}1)$$

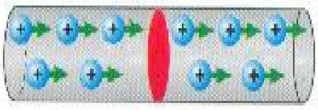
ووحدات SI للتيار التى هو كولوم لكل ثانية تسمى الأمبير .

والأمبير الواحد (A) = كولوم واحد لكل ثانية (C/s) .

وإذا كانت الشحنات التى فى الحزمة موجبة ، فإن كلاً من Δq و I يكون موجبًا . أما إذا كانت الحزمة تتألف من شحنات سالبة فإن كلاً من Δq و I يكون سالبًا . ولهذا السبب يكون تدفق الشحنة السالبة فى اتجاه ما مكافئًا لتيار موجب فى الاتجاه المعاكس . وقد نعترض ، بأنه حيث قد ثبت أن الشحنات الفعلية التى تتحرك داخل الموصلات هى إلكترونات ، فلابد أن يُعرَّف التيار بدلالة تدفق الشحنة السالبة . على أنه من الناحية التاريخية ، وقبل أن تُعرف إشارة ناقلات الشحنة ، فإن التيار كان يُعرَّف بدلالة حركة الشحنات الموجبة . وبمجرد أن عُرفت طبيعة ناقلات الشحنة لم يكن هناك إلزام بتغيير التعريف وذلك لأن التكافؤ بين تدفق الشحنة الموجبة والشحنة السالبة بسيط للغاية .

ولكى نعرف ماذا يعنى هذا التعريف بالنسبة للتيارات المارة فى الأسلاك سنرجع إلى الشكل 2–18 . لو أن مقدارًا من الشحنة Δq يمر من خلال مقطع مستعرض عند A فى زمن مقداره Δt ، فإن التيار فى السلك يُعرَّف بالمعادلة 1–18 وهو :

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$



شكل 2–18:
يُعرَّف التيار بالأمبير ـــ المار فى السلك على أنه كمية الشحنة الموجبة بالكولوم المتدفقة خلال مقطع مستعرض مثل A فى الثانية .

تمامًا كما فى الشكل 1–18 . ومرة أخرى يعتبر التيار متدفقًا فى اتجاه حركة الشحنة الموجبة ، متفقًا فى ذلك مع تعريفنا السابق .

مثال توضيحى 1–18

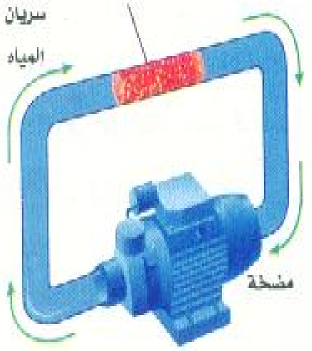
كان التيار خلال بصيلة المصباح الكهربى للجيب هو 0.150 A . ما عدد الإلكترونات المتدفقة خلال البصيلة فى الثانية الواحدة ؟

استدلال منطقى : بما أن التيار هو مقدار الشحنة المارة عبر نقطة فى الثانية ، لذا فنحن نعلم أن 0.150 C من الشحنة تمر خلال البصيلة كل ثانية . ونعلم أيضًا أن كل إلكترون يحمل شحنة مقدارها 1.6×10^{-19} C . وعلى هذا يكون عدد الإلكترونات التى يجب أن

تكوّن شحنة مقدارها 0.150 هو :

$$\text{عدد الإلكترونات} = \frac{0.15\ C}{1.60 \times 10^{-19}\ C/electron} = 9.3 \times 10^{17}\ \text{إلكترونًا}$$

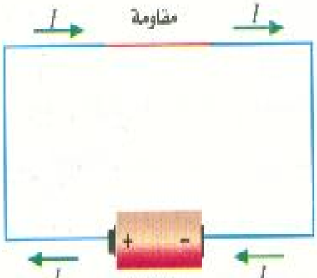
وكما سنرى بعد قليل فإن هذا العدد الهائل من الشحنات المتدفقة هو الذى يجعل التيارات الكهربية المارة فى الأسلاك شبيهة بتدفق المياه فى الأنابيب . ■



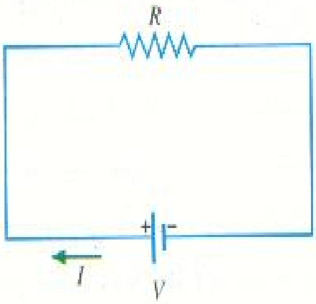
شكل 3-18:
يسبب الاحتكاك تباطؤ الجسم إلى أن يتوقف تمامًا .

18-2 دائرة كهربية بسيطة

قبل أن نشرع فى دراسة الأسلوب الذى تسلكه دائرة كهربية ما ، فسننظر فى حالة أكثر سهولة فى التصور ، وهى سريان الماء خلال الأنابيب . يوضح الشكل 3-18 منظومة أنابيب مملوءة تمامًا بالماء . تقوم مضخة بتوفير الطاقة التى تنتقل إلى جزيئات الماء وتدفعها إلى السريان خلال الأنبوبة ، وحيث أن الماء يملأ المنظومة كلها وهو أيضًا غير قابل للانضغاط فإن جميع أجزاء الأنبوبة ستحمل نفس تيار الماء . والأنبوبة من الكبر بحيث لن يحدث سوى القليل من الفقد نتيجة اللزوجة ، على أن قسمًا من الأنبوبة يميز بكلمة « مقاومة » قد حشى بالصوف الزجاجى حتى يجد الماء صعوبة كبيرة فى المرور من خلاله . ومن الواضح أن قسم المقاومة يشكل العقبة الرئيسية للتدفق ؛ حتى أن كل الطاقة المنتقلة إلى الماء تقريبًا ستظهر كفقد للطاقة نتيجة اللزوجة (أى على هيئة حرارة) فى قسم المقاومة . وعمليًا فإن الماء - ببساطة - يحمل الطاقة من المضخة إلى قسم المقاومة حيث تتحول الطاقة إلى طاقة حرارية .



(أ)



(ب)

شكل 4-18:
البطارية تجعل الشحنات تسرى فى الدائرة . وتنطلق الطاقة التى أعطيت للشحنات من جانب البطارية على هيئة حرارة فى المقاومة . والجزء (ب) من الشكل هو تخطيط للدائرة الموضحة فى (أ) .

ويوضح الشكل 4-18 (أ) منظومة كهربية مماثلة حيث تتصل بطارية بسلكين معدنيين لتكون ما يسمى **دائرة كهربية** . وبما أن السلك الأحمر أدق بكثير من الأسلاك السوداء ، فإنه يشكل مقاومة كبيرة جدًا لتدفق الشحنة من خلاله* . وتحتوى هذه الأسلاك على عدد هائل من الإلكترونات الحرة التى نستطيع تشبيهها بجزيئات الماء الذى يتدفق فى الأنبوبة الواردة فى الشكل 3-18 . ومثلما كانت المضخة تمد جزيئات الماء بالطاقة ، فإن البطارية تمد الشحنات الحرة داخل المعدن بالطاقة وتجعلها تتدفق .

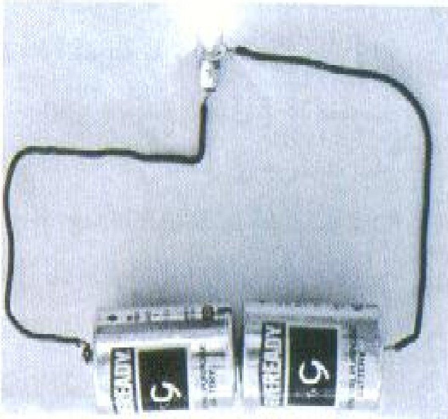
لاحظ أن التيار الموجب يسرى **من** الطرف الموجب للبطارية متوجهًا **إلى داخل** الطرف السالب . وقد رأينا فى الفصل السابق أن البطارية تؤدى نفس الوظيفة عند شحن مكثف . على أن الأمر لم يستغرق هناك سوى زمن قصير لأن المكثف قام ببناء جهد مساوٍ لذلك الذى للبطارية بسرعة أما فى الحالة الراهنة ، فإن سريان الشحنة خلال البطارية والدائرة يكون **مستمرًا** .

إن معظم الطاقة التى توفرها البطارية يفقد على هيئة حرارة عندما تتدفق الشحنة

---

* ويمكن بدلاً من ذلك أن يصنع السلك الملون من معدن آخر ومقاومته أكبر بكثير تجاه سريان الشحنة عن المعدن المستخدم فى توصيل باقى الدائرة . ومن أمثلة هذه المنظومة تلك التى يستخدم فيها الحديد للسلك الملون والنحاس للسلك الأسود .

خلال السلك ذى المقاومة المرتفعة . أى أن الشحنات المتدفقة تحمل - ببساطة - الطاقة من البطارية إلى المقاومة ؛ حيث تتحول طاقتها إلى طاقة حرارية عند اصطدامها مع ذرات المادة المقاومة . والحقيقة ، أنه لو كانت كمية الحرارة المتولدة فى المقاومة كبيرة بما يكفى فإن السلك يصبح ساخنًا لدرجة الابيضاض . ويوضح الشكل 5-18 مثالاً لهذا حيث تقوم البطارية بجعل الشحنة تتدفق خلال بصيلة مصباح كهربى . وتتوهج فتيلة البصيلة وهى من سلك دقيق كالشعرة إلى درجة الابيضاض عندما تنطلق من خلالها الطاقة التى وفرتها البطارية .



شكل 5-18:
دائرة بسيطة . من أين يأتى الضوء والحرارة اللتان تشعهما البصيلة ؟

يوضح الشكل 4-18 (ب) المخطط المستخدم لتمثيل الدائرة المرسومة فى (أ) . لاحظ الرمز ⩘⩘ المستخدم للدلالة على سلك المقاومة . وسنسمى هذا الرمز **مقاوم** . أما كل الأسلاك الأخرى فى الدائرة فإن مقاومتها ستعتبر مهملة ولذا لن تتولد بها أية حرارة تذكر . وتصل الطاقة التى توفرها بطارية قوتها V إلى المقاوم R حيث تتحول هناك إلى طاقة حرارية .

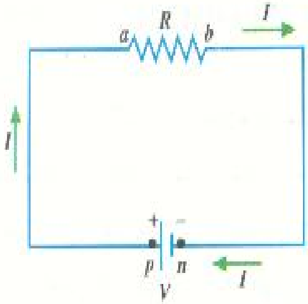
وقبل أن نغادر هذا القسم لابد أن نشير إلى تشابه آخر بين سريان الماء فى أنبوبة وسريان الشحنة فى دائرة كهربية . ففى الدائرة المائية ، يكون واضحًا أن كمية الماء إذا دخلت من أحد طرفى المضخة فإن كمية مساوية ستتدفق من الطرف الآخر . وبما أن الأنبوبة مملوءة ، فإن الماء لن يستطيع أن يتدفق فى قسم إلا إذا تدفق فى جميع الأقسام . ومثلما تسلك جزيئات الماء فإن الشحنات الحرة فى دائرة كهربية تملأ « الأنابيب » التى تحملها وهى الأسلاك . وعندما تتدفق أية كمية من الشحنة داخل أحد طرفى البطارية ، فإن كمية مساوية لها لابد وأن تتدفق خارج الطرف الآخر . ولهذا فإن التيار (سريان الشحنة فى الثانية) يكون هو نفسه فى كل مكان فى الدائرة المرسومة فى الشكل 4-18 .

3-18 المقاومة وقانون أوم

سنفحص الآن الدائرة المبينة فى الشكل 6-18 . بما أننا اعتبرنا أن جزءًا مهملاً فقط من فقد الطاقة هو الذى يحدث فى السلك فى المنطقة من p إلى a ولذا لن تتغير طاقة الشحنات عندما تنتقل خلال هذا القسم من السلك . بعبارة أخرى يكون السلك pa متساوى الجهد ، أى أن النقطة a عند نفس الجهد الكهربى الذى تكون عنده النقطة p .

وبالمثل النقطة b عند نفس جهد النقطة n . ومن ثم نصل إلى حقيقة أن فرق الجهد عبر المقاوم هو نفس فرق الجهد عبر البطارية وهو V .

وحيث أن الطرف a للمقاوم متصل بالطرف الموجب للبطارية ، فإن النقطة a عند جهد أعلى من النقطة b . وأية شحنة موجبة حرة الحركة خلال القاوم سوف تتحرك من a إلى b . وبعبارة أخرى من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض . ومن ثم يكون اتجاه التيار خلال المقاوم من a إلى b . وفي الحقيقة فإن :

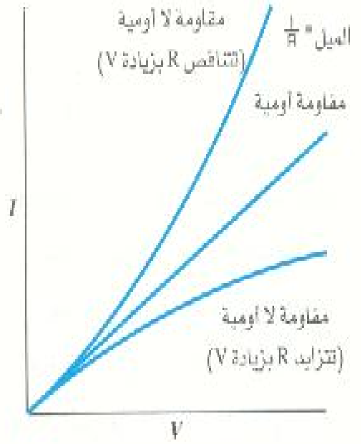


شكل 6-18:
يسبب الاحتكاك تباطؤ الجسم إلى أن يتوقف تماما .

يكون اتجاه التيار خلال مقاوم من الطرف ذي الجهد المرتفع إلى الطرف ذي الجهد المنخفض للمقاوم .

ويتم تمييز المقاوم عادة بمقاومته R . وإذا تسبب فرق جهد مقداره V عبر المقاوم في مرور تيار I خلاله ، فإن المقاومة تعرف بالعلاقة :

$$V = IR \qquad \text{أو} \qquad R = \frac{V}{I} \qquad (18\text{–}2)$$



شكل 7-18:
رسم بياني لاعتماد التيار على الفولطية المطبقة بالنسبة لمقاومات أومية ومقاومات لا أومية .

ووحدة المقاومة هي فولت لكل أمبير ، وتسمى هذه الوحدة أوم (Ω) . وقد اقترح تعريف المقاومة المعبر عنه بالمعادلة 2-18 أول مرة على يد جورج سيمون أوم (1787-1854) ، الذي أوضحت تجاربه أن I تتناسب مع V .

وبناء على هذا فإن المعادلة 2-18 كثيرًا ما تسمى **قانون أوم** . على أن الدقة تستدعي أن ينطبق قانون أوم فقط على المقاومات التي يكون فيها I متناسبًا مع V على مدى معين من قيم V و I . ومثل هذه المقاومات تسمى مقامات **أومية** ، وتتميز بأن الرسم البياني بين I و V يكون خطًا مستقيمًا كالمبين في الشكل 7-18 . على أن المقاومة في كثير من المواد ، كما تُعرِّفها المعادلة 2-18 ؛ ليست ثابتة ، وإنما تعتمد على قيم V و I وتسمى المقاومات في هذه الحالة **لا أومية** . وتكون الخطوط البيانية للعلاقة بين I و V بالنسبة لهذه المواد الخطية ، كما هو مبين في الشكل 7-18 .

مثال توضيحي 2-18

بصيلة مصباح كهربي للجيب تسحب تيارًا مقداره 0.160 A عندما يكون فرق الجهد عبرها 3.10 V . ما هي مقاومة البصيلة ؟

استدلال منطقي : الشكل 5-18 يوضح هذه الحالة ؛ ومن المعطيات أن $V = 3.10\ V$ عبر المقاوم (وهو في هذه الحالة فتيل البصيلة) وأن التيار I خلالها هو 0.160 A . وعند استخدام قانون أوم $V = IR$ فإن :

$$R = \frac{V}{I} = \frac{3.10\ \text{V}}{0.160\ \text{A}} = 19.4\ \Omega$$

وسوف نرى في القسم التالي أن مقاومة البصيلة أقل بكثير لو كانت سخونة فتيلها لم تصل لدرجة الابيضاض ■ .

4-18 المقاومية واعتمادها على درجة الحرارة

إن للأسلاك ذات الحجم والشكل الواحد ولكنها مصنوعة من مواد مختلفة مقاومات مختلفة . فسلك نحاسى ، مثلاً ، مقاومته أقل من مقاومة سلك حديدى له نفس الحجم . ولذلك فإننا بحاجة إلى وسيلة من شأنها تمييز خصائص المقاومة الذاتية للمادة .

ولعمل هذا سنعتبر سلكًا طوله L ومساحة مقطعة المستعرض A كالذى يوضحه الشكل 8-18 . ولعلك خمنت أن مقاومة السلك تزداد بزيادة طوله L ، وتقل إذا زادت A . وقد أوضحت التجارب بالفعل أن ،

$$R \propto \frac{L}{A}$$

ويمكننا إزالة علامة التناسب إذا استخدمنا ثابت التناسب ρ (وهو الحرف اليونانى « رو ») :

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \text{أو} \qquad \rho = R\frac{A}{L} \qquad (18\text{-}3)$$

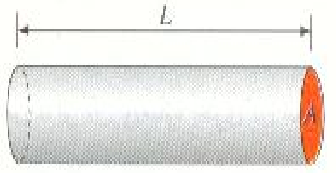
ووحدات ρ هى أوم . متر وتعتمد قيمتها على مادة السلك . ويطلق على ρ مقاومية المادة . وبالنسبة للموصلات ذات التوصيل الكهربى الجيد جدًا كالنحاس فإن ρ تكون صغيرة . ويوضح الجدول 1-18 بعض القيم النموذجية للمقاومية . لاحظ أن القيم المذكورة تخص العوازل (غير الموصلات) وكذلك الفلزات . وتحتوى العوازل كالخشب والزجاج على عدد قليل من الأيونات (وهى عادة ما تكون من الشوائب) التى تؤدى إلى حركة الشحنة عندما يطبق فرق جهد على المادة . ولهذا فإن مقاومية هذه المواد كبيرة جدًا وإن كانت ليست لا نهائية .

ومقاومية مادة ما تتغير بتغير درجة الحرارة . فمقاومة فتيل معدنى مثلاً ، فى بصيلة مصباح كهربى متوهج تزداد لأكثر من عشرة أضعاف عندما تتغير درجة الحرارة من درجة الغرفة إلى أن يصير الفتيل ساخنًا إلى درجة الابيضاض . ويكون التغير النسبى فى المقاومية متناسبًا مع التغير فى درجة الحرارة فى مدى محدد من درجات الحرارة :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \alpha \Delta T \qquad (18\text{-}4)$$

والمقدار ρ_0 فى هذه المعادلة هو المقاومية عند درجة حرارة مرجعية وهى عادة 20°C . أما الثابت α فيسمى **معامل تغير المقاومية مع درجة الحرارة** وهو يعتمد على نوع المادة . والقيم النموذجية الواردة فى الجدول رقم 2-18 صحيحة فقط للتغيرات المعتدلة فى درجة الحرارة بالقرب من درجة الحرارة المرجعية . وعلى الرغم من أن مقاومية معظم الفلزات تزداد بازدياد درجة الحرارة ، إلا أن العكس هو الصحيح بالنسبة للجرافيت ومعظم أشباه الموصلات (لاحظ الإشارة السالبة فى الجدول 2-18) .

وكما يتضح من المعادلة 3-18 ، فإن مقاومة سلك ما تعتمد على أبعاده وعلى المادة التى صنع منها . وهذه الأبعاد تعتمد بدورها على درجة الحرارة كما سبق ودرسنا فى



شكل 8-18:
تتناسب مقاومة سلك منتظم طرديا مع طوله L وعكسيا مع A .

جدول 1-18 :
المقاومية عن 20°C

المادة	$\rho(\Omega.m)$
الفضة	1.6×10^{-8}
النحاس	1.7×10^{-8}
الألومنيوم	2.8×10^{-8}
التنجستين	5.6×10^{-8}
الحديد	10×10^{-8}
الجرافيت	3.5×10^{-5}
الدم	1.5
الدهون	25
الخشب	$10^{8} - 10^{12}$
الزجاج	10^{12}
البولى ستيرين	$10^{15} - 10^{19}$

جدول 2-18 :
معامل تغير المقاومية مع درجة الحرارة عند 20°C

المادة	α (لكل °C)
الفضة	0.0038
النحاس	0.0039
الألومنيوم	0.0040
التنجستين	0.0045
الحديد	0.0050
الجرافيت	-0.0005
الجرمانيوم	-0.05
السيليكون	-0.07

الفصل الحادى عشر . على أن معاملات التمدد الحرارى تكون فى العادة أقل بعدة رتب فى المقدار عن معاملات المقاومية الموضحة فى الجدول 2-18 . ولهذا فإن التغيرات الحرارية التى تطرأ على أبعاد القاوم ، يمكن - عادة - إهمالها إذا قورنت بتغيرات المقاومية . ومن ثم نستطيع أن نكتب نفس المعادلة بالنسبة لتغير المقاومة R مع درجة الحرارة لمقاوم محدد مثلما فعلنا مع ρ :

$$\Delta R = R_0 \, \alpha \, \Delta T \qquad (18\text{-}5)$$

وحيث أن المقاومة تتغير مع درجة الحرارة لذا يمكن استعمالها فى قياس درجة الحرارة . وبالفعل فإن مجسات إلكترونية صغيرة تستخدم حاليًا على نطاق واسع كثرمومترات للحمى - بناء على هذه الحقيقة . ويستعمل فى هذه الأدوات مقاومات شبه موصلة وهى مواد معامل تغير المقاومية مع درجة الحرارة لها مرتفع بشكل خاص .

مثال توضيحى 3-18

سلك نحاسى من طراز معين تبلغ مساحة مقطعه المستعرض $0.0331\ \text{cm}^2$. فما هى مقاومة قطعة منه طولها $40.0\ \text{m}$ ؟

استدلال منطقى : سوف نستخدم العلاقة $R = \rho\left(\frac{L}{A}\right)$ حيث $L = 40.0\ \text{m}$ و

$A = 0.0331 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$ و $\rho = 1.7 \times 10^{-8}\ \Omega.m$

$$R = \rho\left(\frac{L}{A}\right) = \frac{(1.7\times10^{-8}\ \Omega.\text{m})(40.0\ \text{m})}{0.0331\times10^{-4}\ \text{m}^2} = 0.20\ \Omega$$

قطر هذا النوع من السلك هو الشائع فى أسلاك التوصيل ومنه ترى سبب إهمالنا لمقاومة مثل هذه الأسلاك فى العادة .

مثال 1-18 :

تبلغ مقاومة فتيل بصيلة مصباح إضاءة ، مصنوع من التنجستين $240\ \Omega$ عندما تصل حرارته إلى درجة الإبيضاض (عند نحو $1800°\text{C}$) . أوجد المقاومة التقريبية للبصيلة عند درجة حرارة الغرفة ($20°\text{C}$) .

استدلال منطقى :

1

سؤال : ما هى المعادلة التى تربط بين التغير فى المقاومة مع تغير درجة الحرارة ؟
الإجابة : إنها المعادلة (5-18) .

سؤال : بما أن قيم α فى الجدول 2-18 ثابتة فقط فى مدى محدود لدرجات الحرارة وتنسب كلها لدرجة حرارة تساوى $20°\text{C}$ ، فكيف أستطيع أن أجد قيمة α المناسبة لهذا المدى من درجات الحرارة ؟

الإجابة : هذا سؤال جيد . عندما لا توجد قيم للمعامل α المناظرة لدرجات الحرارة المرتفعة فكل ما تفعله هو حساب قيمة تقريبية معتبرًا أن α لا تتغير بشكل محسوس يجعل نتيجة حساباتك لا معنى لها .

سؤال : ما هى قيمة المقاومة المرجعية R_0 فى المعادلة 5–18 والتى على أن استخدمها ؟

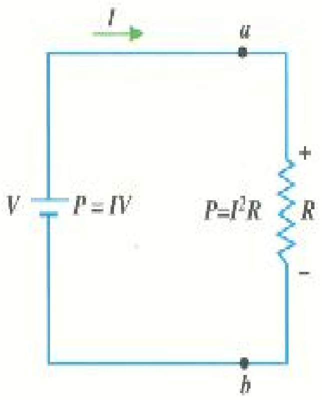
الإجابة : حيث أن عليك افتراض أن قيمة α هى نفسها التى عند $20°C$ فإن القيمة المجهولة للمقاومة R عند $20°C$ هى نفسها المقاومة المرجعية R_0 .

الحل والمناقشة : عند إدخال القيم الواردة فى المعادلة 5–18 نحصل على :

$$\Delta R = 240\ \Omega - R_0 = R_0\ (0.0045/°C)\ (1800°C - 20°C) = 8.0\ R_0$$

ومن ثم : $240\ \Omega = 9.0\ R_0$ أو $R_0 = 27\ \Omega$

18–5 القدرة والتسخين الكهربى



شكل 9–18:
تظهر القدرة التى توفرها البطارية كحرارة فى المقاوم .

عندما تبعث بطارية بتيار خلال مقاوم ، كما فى الشكل 9–18 ، فإن البطارية بهذا تمد المقاوم بالطاقة .

وبالفعل فإن العمليات الكيميائية الداخلية فى البطارية تحرك الشحنة من الجهد الكهربى المنخفض عند الطرف السالب إلى الجهد الكهربى المرتفع عند الطرف الموجب . ولكى يتم هذا فإن على البطارية أن تبذل شغلاً على كمية من الشحنة Δq ، يكون مساويًا للزيادة فى طاقة الوضع الكهربية للشحنة .

$$W = \Delta \text{EPE} = \Delta q\ V$$

حيث V هى فولطية البطارية . وبمرور الشحنة خلال المقاوم R من النقطة a إلى النقطة b فإنها تفقد الطاقة التى أمدتها بها البطارية مولدة بذلك كمية مساوية من الطاقة الحرارية فى المقاوم .

إذا تحركت شحنة مقدارها Δq خلال البطارية (والمقاوم) فى زمن مقداره Δt ، فإن القدرة التى تسلمها البطارية تكون حسب المعادلة 2–5 هى

$$\text{القدرة} = \frac{\text{الشغل المبذول}}{\text{الزمن المستغرق}} = \frac{\Delta q V}{\Delta t}$$

ولكن $\Delta q/\Delta t$ ليست سوى التيار المار فى الدائرة ، ومن ثم تكون القدرة التى يقدمها مصدر للفولطية V عندما يعمل على إمرار تيار I هى

$$\text{القدرة} = IV \qquad (18\text{–}6)$$

وعند مرور الشحنات خلال المقاوم ، فإنها تهبط خلال فرق للجهد مقداره V . وبناء عليه فإن المعادلة 6–18 تعطينا أيضًا القدرة الكهربية المفقودة داخل المقاوم . وبالتالى يكون لدينا العلاقة التالية لفقد القدرة الكهربية بالنسبة لتيار I يمر خلال المقاوم R :

$$\text{القدرة المفقودة داخل المقاوم} = IV = I^2R = \frac{V^2}{R} \qquad (18\text{–}7)$$

حيث أمكن كتابة هذه العلاقة باستخدام $V = IR$.

وقد تعلمنا فى القسم 2–5 أن وحدة القدرة هى جول لكل ثانية وهى الوحدة المسماة وات (W) ولعلنا معتادون على استخدام هذه الوحدة فى الكهرباء لأننا نقرأها على مصابيح الإضاءة والأجهزة الكهربائية فلو أنك فحصت بصيلة إضاءة مقدارها 60 W مثلا . لوجدت مطبوعا عليها « 60 W, 120 V » . ومعنى هذا أن البصيلة تستهلك 60 W من القدرة عندما يطبق عليها جهد مقداره 120 V . ومن الأمثلة الأخرى المدفأة الكهربائية المكتوب عليها 1500 W والتى تستخدم عند جهد مقداره 120 V . وحيث أن القدرة هى شغل مبذول فى وحدة الزمن فإن مدفأة الأماكن ستوفر حرارة مقدارها 1500 J كل ثانية عند تشغيلها بفرق جهد مقداره 120 V .

وتستمد الطاقة الكهربية اللازمة لتشغيل الأجهزة المنزلية المختلفة من محطات التوليد التى تديرها شركات القوى التى تتقاضى منا لما نستهلكه من طاقة مقدرة بوحدات الكيلو وات ساعة (kWh) ، ولابد إنك تذكر من القسم 2–5 أن وحدة الطاقة التى تستخدمها شركات القوى الكهربائية ، وهى كيلو وات ساعة تكافئ 3.6×10^6 J .

وتوضح لنا المعادلة 6–18 أن الوات ، بالمصطلحات الكهربية هو حاصل ضرب الأمبير فى الفولت . ولذا فإن التيار الذى يسحبه جهاز ما يمكن حسابه بسرعة بمعرفة جهد التشغيل والقدرة المستهلكة :

$$I = \frac{P}{V}$$

ومصباح الإضاءة ذو البيانات 100 W, 120 V يسحب تيارًا مقداره :

$$I = \frac{100\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 0.83\ \text{A}$$

أما المحرك الذى قدرته حصان واحد (1 hp) أو (746 W) ويعمل عند جهد مقداره 120 V فيسحب تيارًا مقداره

$$I = \frac{746\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 6.2\ \text{A}$$

وسوف نقدم المزيد من المناقشة عن أهمية التيار المسحوب بواسطة الأجهزة فى القسم 18–11 .

مثال توضيحى 18–4

ما مقدار الحرارة التى تولدها بصيلة مصباح كهربائى 40 W فى 20 min ؟

استدلال منطقى :

بما أن القدرة هى الشغل المبذول فى وحدة الزمن فإن البصيلة تولد 40 J من الحرارة كل ثانية . وعلى هذا يتولد فى 20 min حرارة تساوى :

الحرارة = (40 J/s) (20 min) (60 s/min) = 478,000 J

تمرين : كم عدد السعرات لهذا القدر من الحرارة ؟ **الإجابة : 11,500 cal** .

مثال 18-2 :

عند تحضير ثمانية أكواب (نحو 1.6 kg) من القهوة يلزم رفع درجة حرارة الماء من 20°C إلى نحو 90°C . افترض أن جهاز صنع القوة الذى تستعمله قدرته 700 W . فما الفترة الزمنية اللازمة لتحضير القوة ؟ وإذا كان 1 kWh يكلف نحو $ 0.10 فكم تكون تكلفة الطاقة المستخدمة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما علاقة الزمن بهذه المسألة ؟

الإجابة : إن تقدير 700 W يعنى أن جهاز تحضير القهوة قادر على إمداد الطاقة بمعدل 700 J/s .

سؤال : ما مقدار الطاقة اللازمة لإنجاز هذا العمل ؟

الإجابة : تذكر العلاقة بين الكتلة وتغير درجة الحرارة وكمية الحرارة والواردة بالمعادلة 11-1 .

كمية الحرارة Q = الكتلة m × الحرارة النوعية c × ΔT

والحرارة النوعية للماء هى 1 kcal/kg.°C .

سؤال : كيف يمكننى التحويل من kcal إلى J (جول) ؟

الإجابة : استخدم المكافئ الميكانيكى للحرارة (الفصل 11) :

$$1\ \text{kcal} = 4184\ \text{J}$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تحدد زمن تحضير القهوة ؟

الإجابة : القدرة = $\frac{\text{الطاقة}}{\text{الزمن}}$ ، ولهذا فإن :

الزمن = $\frac{\text{الطاقة اللازمة}}{\text{القدرة}}$

سؤال : ما هى العلاقة بين الزمن والتكلفة ؟

الإجابة : إن الدفع يكون عادة على أساس الكيلووات ساعة . وعليك بضرب قدرة الأداة (0.700 kW) فى الزمن الذى تعمل فيه (بالساعات) لكى تجد عدد وحدات الكيلووات ساعة .

الحل والمناقشة : الطاقة اللازمة هى

$$(1.6\ \text{kg})(1\ \text{kcal/kg. C°})\ (70\ \text{C°}) = 112\ \text{kcal}$$

وهذا المقدار يكافئ

$$(112\ \text{kcal})\ (4184\ \text{J/kcal}) = 4.7 \times 10^5\ \text{J}$$

وإذا كان معدّل التحضير 700 J/s فإن زمن التحضير يكون

$$t = \frac{4.7\times10^5\ \text{J}}{700\ \text{J/s}} = 671\ \text{s} = 11.2\ \text{min}$$

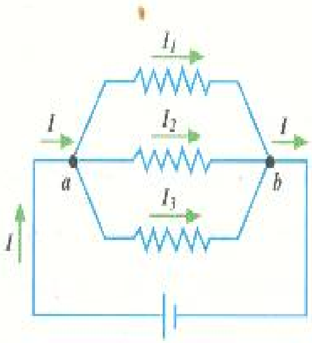
أو ما يساوى 0.187 h .

ولحساب التكلفة لابد أولاً من حساب عدد وحدات kWh من الطاقة المستهلكة :

عدد وحدات $kWh = (0.187\ h)\ (0.700\ kW) = 0.13\ kWh$

فإذا كانت التكلفة \$ 0.10 لكل kWh فإن التكلفة تكون نحو 1.3 سنت .

18-6 قاعدة النقطة لكيرتشوف



شكل 10–18:
تنص قاعدة النقطة لكيرتشوف على أن :
$I = I_1 + I_2 + I_3$

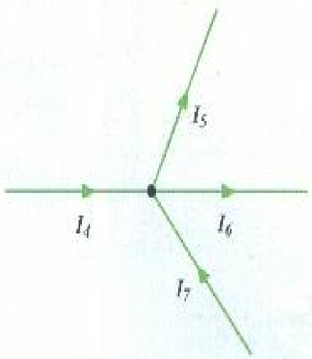
لقد ناقشنا حتى الآن التيار المار فى سلك منفرد ، حيث لابد للشحنة أن تسرى خلال نفس المسار . وقد أشرنا فى القسم 2–18 إلى المسار الذى يسمح للتيار بالمرور فيه **بالدائرة الكهربية** . على أن الدوائر قد يكون بها أكثر من مسار تتبعه التيارات . ويبين الشكل 10–18 دائرة تستطيع الشحنات فيها أن تسلك أى مسار من ثلاثة فيما بين النقطتين a و b . وهذه الدوائر أكثر تعقيداً من دوائر العروة المنفردة . ويتطلب تحليلها استخدام قاعدتين أساسيتين تسميان **قاعدتا كيرتشوف** . وهما واضحتان تمامًا ومن السهل فهمهما .

وللتعرف على القاعدة الأولى ، اعتبر النقطة a فى الشكل 10–18 ، حيث يدخلها التيار I ، بينما تخرج منها التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 . وترتبط بين هذه التيارات علاقة بسيطة ، حيث يتطلب قانون بقاء الشحنة أن الشحنة لا توجد من العدم كما أنه لا يمكن تدميرها عند أية نقطة كهذه . والتيار الداخل إلى النقطة يتفرع ببساطة إلى مختلف المسارات المتاحة . ولو أنك جمعت كل التيارات الخارجة من النقطة فلابد أن تحصل على نفس مقدار التيار الكلى الداخل إلى النقطة . وفى حالة الشكل 10–18 فإن هذا يعنى :

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

ولابد لهذا المبدأ أن يظل صحيحًا بغض النظر عن مدى تعقيد النقطة أو موقعها . وتسمى هذه الملاحظة البسيطة **قاعدة النقطة لكيرتشوف :**

إن مجموع كل التيارات الداخلة إلى نقطة لابد وأن يساوى مجموع كل التيارات الخارجة من تلك النقطة .

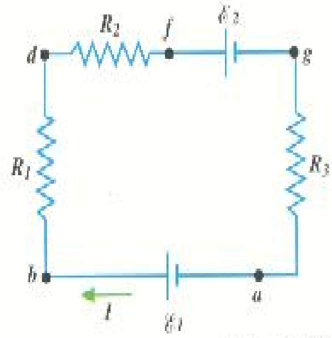


شكل 11–18:
طبقًا لقاعدة النقطة فإن :
$I_4 + I_7 = I_5 + I_6$

وقاعدة النقطة على جانب كبير من الأهمية عند **تحليل الدوائر** ، حيث يكون الهدف النهائى هو معرفة قيم التيارات المارة فى كل من المسارات الممكنة بالدائرة . والخطوة الأولى فى تحليل الدوائر التى بها أكثر من مسار ممكن للتيار أو ، **فرع** ، هو بتحديد رمز للتيار فى كل فرع منفصل فى مخطط الدائرة . وعليك أيضًا أن تحدد إتجاهًا لكل من هذه التيارات حتى تتمكن من تطبيق قاعدة النقطة على كل نقطة يتفرع عندها التيار . ويوضح الشكل 11–18 مثلاً ، نقطة تتضمن أربعة أفرع . وبالنسبة للتيار المرقمة كما فى الشكل فإن قاعدة النقطة تنص على أن $I_4 + I_7 = I_5 + I_6$. والنقطة المهمة الواجب إدراكها هى أن **تيارًا واحدًا فقط هو الذى يمكن أن يوجد فى فرع ما** ، وأن

الشحنة لابد أن تسرى ، إما فى اتجاه ما أو فى عكســه بـين نقطتـين . ولـو حـدث أن قمت بتمييز تيار ما فى الاتجاه المضاد لاتجاهه الحقيقى ، فإن أسوأ ما يمكن أن يحدث أن نتيجة الحل لذلك التيار ستكون رقمًا سالبًا .

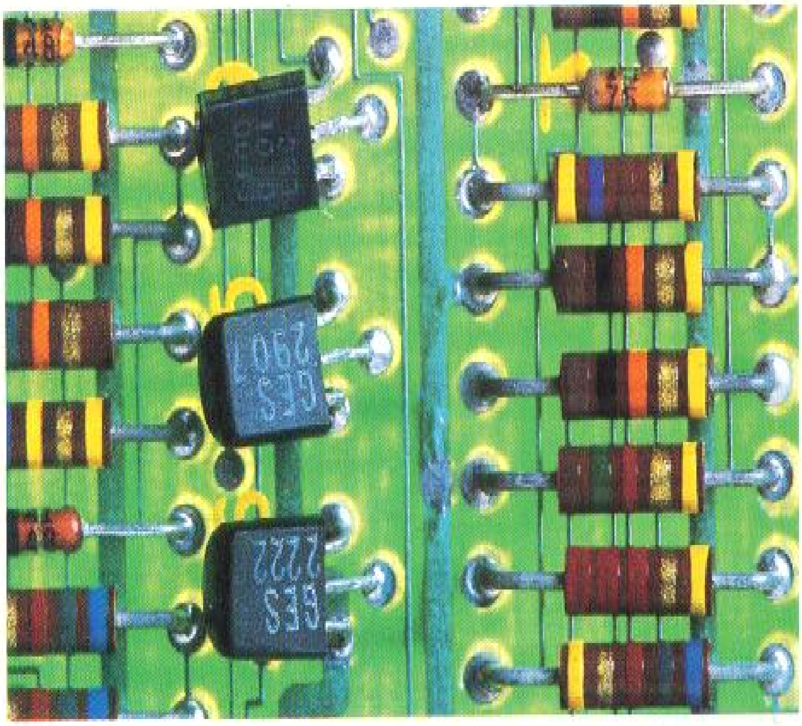
18–7 قاعدة العروة لكيرتشوف



شكل 12–18:
ما هو قول قاعدة العروة لكيرتشوف فـى هذه الدائرة ؟

ولكى نفهم القاعدة الثانية لكيرتشوف سنتدبر عروة منفردة من دائرة كما هو مبين فى الشكل 12–18 ، حيث يمر تيـار مستمر I فـى الاتجـاه الموضـح . وفـى هـذه الظـروف المستقرة نستطيع أن نحلل تغيرات الجهد إزاء انتقال الشحنة خلال الدائرة .

وسنبدأ عند النقطة a ، ونتتبع حركة شحنة Δq خلال النقط b ، d ، f و g حتـى نرجع إلى a مرة أخرى . وسوف تتلقى الشحنة دفعـة مـن الطاقـة مقدارهـا $\Delta q\mathscr{E}_1$ عنـد مرورها خلال البطارية الأولى من الطرف السالب إلى الطرف الموجب . ثم تفقد طاقـة لما تولده من حرارة عند مرورها خلال R_1 و R_2 و R_3 . كما أنها تفقد طاقة وضع عندما تمـر عكسيًا (من الطرف الموجب إلى الطرف السالب) خلال البطارية $\mathscr{E}_2$. ومـن مقتضيـات بقاء الطاقة أن الكسب والفقد فى الطاقة يتوازيان عندما تعود الشحنة إلى نقطة البدايـة a . والتيار المستمر (dc) ، الذى هو معدل سريان الشحنة ، ثابت ، ومعنى هذا أن الشحنـة لا تستطيع أن تجنى أو تخسر مقدارًا صافيًـا مـن الطاقـة بمجـرد مرورهـا بـالعروة مـرارًا وتكرارًا لأنه من أين يتأتى للطاقة الزائدة أن تتولد وإلى أين تنصرف ؟



يستخدم العديد من المقاومات فى تشكيلات معقدة فى دوائر الأجهزة الحديثة .

وهكذا فإن الشحنة Δq سيكون لـها فى كل نقطة فى الدائرة قيمة معينة لطاقـة الوضـع الكهربية . وهذا ـ بدوره ـ يعنى أن لكل نقطة مقدارًا محددًا من الجهد الكهربى بالنسبة لنقطة بداية معينة . فإذا بدأنا وانتهينا عند نفس النقطـة فـى الدائـرة ، فإننـا نعـود إلى

نفس قيمة الجهد وتلخص **قاعدة العروة لكيرتشوف** هذه الحقيقة :

لابد أن يكون المجموع الجبرى لتغيرات الفولطية (فروق الجهد) حول أية عروة مقفلة في دائرة ما صفرًا .

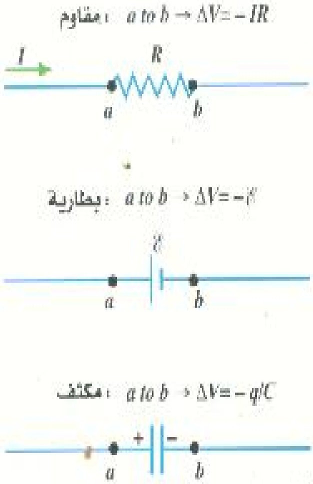
وكما نلاحظ فإن قاعدة العروة وثيقة الصلة بارتفاعات وانخفاضات الجهد ولهذا السبب سنحاول التعرف على ما يحدث للجهد عندما نتحرك عبر مقاوم وبطارية ومكثف .

افترض أننا نتحرك من a إلى b من خلال المقاوم المبين في الشكل 13-18 . ونعلم أن اتجاه التيار يكون دائمًا من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض خلال مقاوم ما ، وعلى ذلك يكون التغير من a إلى b هو انخفاض في الجهد ، ومن ثم تكون إشارته سالبة أما مقداره فيكون IR حسبما ينص قانون أوم . أى أن التغير في الجهد عند التحرك من a إلى b سيكون $-IR$.

ويدل رمز البطارية على أن الجانب الأيسر للبطارية في الشكل 13-18 موجب . ولهذا تكون النقطة a عند جهد أعلى من جهد النقطة b بمقدار $\mathscr{E}$ فولت أى أن الحركة من a إلى b يصحبها تغير في الجهد هو $-\mathscr{E}$.

أما بالنسبة للمكثف فلابد أن اللوح a هو الموجب ، أى أنه عند الجهد الأعلى وحيث أن فرق الجهد عبر المكثف يعطى بالمعادلة 6-17 على صورة q/C لذا يكون تغير الجهد عند الانتقال من a إلى b هو $-q/C$. ومن الطبيعي أن أمرًا آخر لابد أن يكون واضحًا فيما يتعلق بفرع دائرة ما ، يكون محتويًا على مكثف . فالمكثف لا يسمح للتيار المستمر (dc) بالمرور من خلاله . وعلى ذلك فأى فرع من فروع الدائرة يكون به مكثف لن يمر به تيار مستمر . والتغير في الجهد في كل من هذه الحالات الثلاث يكون سالبًا عند الانتقال من a إلى b . أما إذا كان الانتقال من b إلى a فإن التغير يكون موجبًا . والجدول 3-18 يلخص نتائجنا هذه .

وسنقوم الآن باستخدام قاعدة العروة في بعض الدوائر البسيطة قبل الانتقال إلى تطبيقاتها الأكثر صعوبة .



شكل 13-18:
في كل من الحالات التي بالشكل يكون الانتقال من a إلى b متمثلا في انخفاض للجهد ، أى تغير سالب للجهد (الفولطية) . أما الانتقال من b إلى a فيعبر عن تغير موجب للجهد .

جدول 3-18 :
تغيرات الجهود عبر عناصر الدائرة في دوائر التيار المستمر

1 ـ مقاومات	
أ ـ في اتجاه التيار	$V = -IR$
ب ـ في عكس اتجاه التيار	$V = +IR$
2 ـ مصادر القوة الدافعة الكهربية $\mathscr{E}$	
أ ـ عبر (emf) من الطرف − إلى الطرف +	$V = +\mathscr{E}$
ب ـ عبر (emf) من الطرف + إلى الطرف −	$V = -\mathscr{E}$
3 ـ مكثفات تحمل شحنة q	
أ ـ عبر C من اللوح + إلى اللوح −	$V = -q/C$
ب ـ عبر C من اللوح − إلى اللوح +	$V = +q/C$
جـ ـ في أى فرع يحتوى على مكثف	$I = 0$

مثال توضيحي 5-18

أوجد التيار المار في الدائرة الموضحة في الشكل 14-18 .

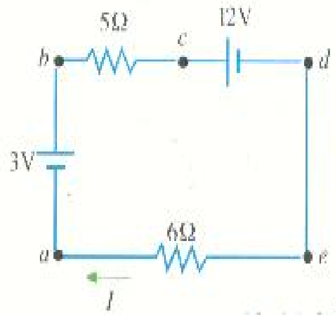
استدلال منطقي : دعنا نخمن أن التيار يمر في الاتجاه المبين بالشكل . (وإذا تذكرنا من القسم 2-18 أن التيار يتدفق من الطرف الموجب ، فقد تعترض بأن تخميننا خاطئ لأن البطارية التي قوتها 12 V سيكون لها بالتأكيد تأثير أقوى على التيار من البطارية التي قوتها 3 V ، على أن أحد الأمور اللطيفة فيما يتعلق بقاعدتي كيرتشوف هى أنه حتى من لا يجيد التخمين الصائب قادر على استعمالها كما سنرى بعد قليل) . سنقوم الآن باختيار نقطة مثل a كبداية وننطلق منها حول الدائرة . وتكون التغيرات في الجهد كما يلي :

$a \to b$	$+3\ \text{V}$
$b \to c$	$-I(5\ \Omega)$
$c \to d$	$-12\ \text{V}$
$d \to e$	$0\ \text{V}$
$e \to f$	$-I(6\ \Omega)$

(من المهم جدًا أن تفهم اختيار الإشارة المستخدمة فى كل حد) وطبقًا لقاعدة العروة ، فإن المجموع الجبرى لتغيرات الجهد هذه لابد وأن يساوى الصفر :

$$3 - I(5\ \Omega) - 12 - I(6\ \Omega) = 0$$

وعند حل هذه المعادلة بحثًا عن I سنجد أن $I = -\frac{9}{11} A$. وتدلنا الإشارة السالبة أن تخميننا حول اتجاه التيار كان خاطئًا فى البداية . وليست هناك مشكلة فى ذلك . لأن التيار $\frac{9}{11} A$ سيكون فى اتجاه معاكس لتخميننا .



شكل 14-18:
عند تعيين مقدار التيار فى هذه الدائرة ، فكيف تدل الإجابة التى حصلنا عليها على أننا قد اخترنا التيار I فى الاتجاه الخاطئ ؟

افترض الآن أننا نختار التيار I يمر فى الاتجاه المعاكس . وإذا تحركنا عندئذ حول الدائرة فى نفس اتجاه الحركة السابق ، فإن **إشارات التغيرات المختلفة فى الجهود عبر المقاومات ستنعكس** (القاعدة 1b فى الجدول 3-18) . وسيمر التيار خلال المقاوم فى اتجاه تناقص V وستكون معادلتنا فى هذه الحالة هى

$$+3 + I(5\ \Omega) - 12 + I(6\ \Omega) = 0$$

وحل هذه المعادلة الآن هو $I = +\frac{9}{11} A$. مما يدل على اختيار صحيح لاتجاه التيار . **لاحظ أن الطريق الذى تسلكه للحركة حول العروة لن تشكل أى فرق فى حساب تغيرات الجهد** . فعند اختيارك لاتجاه التيار ستحصل على نفس الإجابة . إذا اخترت الاتجاه العكسى للتيار فإن الإشارة التى ستنتج فى الحل ستكون معكوسة . ونفترض بطبيعة الحل أنك قد اخترت الإشارة الصحيحة لكل تغير فى الجهد .

تمرين : أوجد قيمة I لو عكست أقطاب البطارية التى قوتها 3 V . **الإجابة : 1.36 A-** .

مثال 3-18

أوجد التيارات فى جميع أفرع الدائرة المبينة فى الشكل 15-18 .

استدلال منطقى :

1

سؤال : كم عدد المعادلات المستقلة التى احتاجها ؟

الإجابة : إنك دائمًا بحاجة إلى عدد من المعادلات المستقلة بقدر ما لديك من كميات مجهولة فى المسألة . وفى هذه الحالة ، فإن كل العناصر فى الدائرة متاحة فيما عدا التيارات المارة فى الأفرع الثلاثة . ولذلك ستحتاج إلى ثلاث معادلات حتى تتمكن من تعيين هذه التيارات .

سؤال : ما هى المعادلة التى أحصل عليها من قاعدة النقطة ؟

الإجابة : النقطتان a و c ستقدمان لك نفس المعادلة :

$$I_3 = I_1 + I_2$$

لاحظ أن I_1 يسرى من a خلال d إلى داخل c ، أما I_3 فيسرى من c خلال b إلى داخل a ، و I_2 يسرى من a إلى c .

سؤال : أى عروة على أن أختار أولاً وفي أى اتجاه لابد وأن أتحرك حولها ؟

الإجابة : اختر أية عروة مقفلة . ثم تحرك حولها فى أى من الاتجاهين . فقط لابد من العناية القصوى فى تطبيق الإشارات بشكل متوافق فى كل مرة يواجهك تغير فى الجهد .

سؤال : ما هى المعادلة التى تقترحها قاعدة العروة عندما أتحرك حول العروة $acda$ ؟

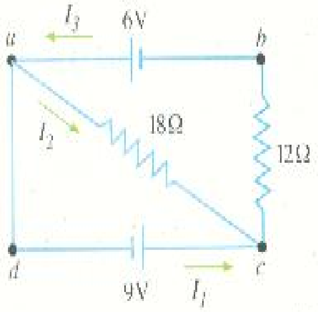
الإجابة : إنك تفقد جهداً مقداره $I_2(18\ \Omega)$ عند الانتقال من a إلى c كما أنك تفقد 9 V عبر (emf) عند الانتقال من c إلى d . ومن ثم :

$$-I_2(18\ \Omega) - 9\ \text{V} = 0$$

سؤال : كيف أتعامل مع التيار I_1 فى المسار cda ؟

الإجابة : هذا المسار لا يمر من خلال مقاوم ولهذا لا يوجد تغير IR فى الجهد . وعند تطبيق قاعدة العروة عند الانتقال عبر (emf) ، عليك بحساب قيمة (emf) بغض النظر عن التيار المار فيها . ولذلك لن يظهر I_1 فى معادلات قاعدة العروة ، وإن كانت ستظهر فى معادلة قاعدة النقطة .

(فى قسم لاحق سنعدل هذا لكى نأخذ مقاومة البطارية فى الاعتبار) .



شكل 15–18:
عين قيمة التيار فى كل من أفرع الدائـرة الثلاثة .

سؤال : كيف أحصل على معادلة ثالثة ؟

الإجابة : إنك لم تأخذ بعد الفرع abc فى الاعتبار ولذا تحتاج إلى معادلة عروة أخرى تتضمنه .

سؤال : إذا سرت حول العروة $abca$. فما هى المعادلة التى تقدمها لى قاعدة العروة ؟

الإجابة : إنك تفقد 6 V عند الانتقال من a إلى b . وتكسب جهداً مقداره $I_3(12\ \Omega)$ من b إلى c (إنك تكسب لأنك تسير فى عكس اتجاه I_3) . وتكسب $I_2(18\ \Omega)$ من c إلى a لنفس السبب .

$$-6\ \text{V} + I_3(12\ \Omega) + I_2(18\ \Omega) = 0$$

الحل والمناقشة : ستقدم لك قاعدتا كيرتشوف - بشكل عام - عدداً من المعادلات التى تحتوى كل منها على مجهول واحد . وحيث أن مجهولين أو أكثر لا يمكن تحديدهما من معادلة منفردة فإن هذه **المعادلات الآنية** لابد أن تعالج حتى تصل إلى معادلة منفردة تختفى منها كل المجاهيل ولا يتبقى سوى مجهول واحد . وقد تكون هذه عملية شاقة وتتطلب انتباهاً حريصاً لقواعد الجبر .

وفى هذه الحالة ، تحتوى أول معادلة عروة على مجهول واحد فقط . ولذا يمكن حلها مباشرة :

$$-18\, I_2 = 9 \quad , \quad I_2 = -0.50\ \text{A}$$

والإشارة السالبة هنا تدل على أن الاتجاه الفعلى للتيار I_2 هو عكس التخمين الخاطئ فى الشكل 15–18 .

ويمكننا الآن التعويض بقيمة I_2 فى معادلة العروة الثانية :

$$-6 + 12\,I_3 + (-0.50)(18) = 0 \qquad , \qquad I_3 = +\,1.25\ \text{A}$$

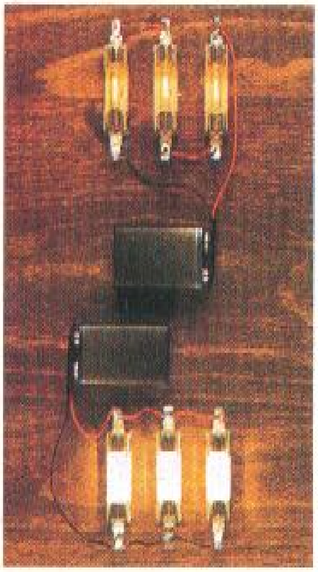
(تأكد من أنك لاحظت التوافق فى استخدام إشارة I_2) . والإشارة الموجبة فى هذه الإجابة تدلنا على أن اتجاه I_3 المبين فى الشكل 15–18 صحيح . أما معادلة قاعدة النقطة فتؤدى إلى معرفة قيمة I_1 :

$$I_1 = I_3 - I_2 = 1.25 - (-0.50\ \text{A}) = +1.75\ \text{A}$$

إن الحاجة إلى ملاحظة الإشارات بشكل صحيح لا يمكن أن تكون من قبل المغالاة فى التأكيد .

تدريب : أوجد I_2 و I_3 لو عكست أقطاب البطارية التى قوتها 9 V .

الإجابة : **0.500 A , −0.25 A**



وصلت ثلاث بصيلات للإضاءة بنفس مصدر الجهد . . البصيلات المتصلة على التوازى تتوهج أكثر سطوعا من تلك المتصلة معًا على التوالى . لماذا ؟

18-8 المقاومات المتصلة على التوالى وعلى التوازى

لقد تعرفنا فى الفصل السابع عشر على طريقتين لتوصيل المكثفات معًا ، على التوازى وعلى التوالى . وسنفحص الآن المقاومة الكلية المكافئة التى تنتج عندما تتصل مجموعة من المقاومات معًا بنفس التشكيلات .

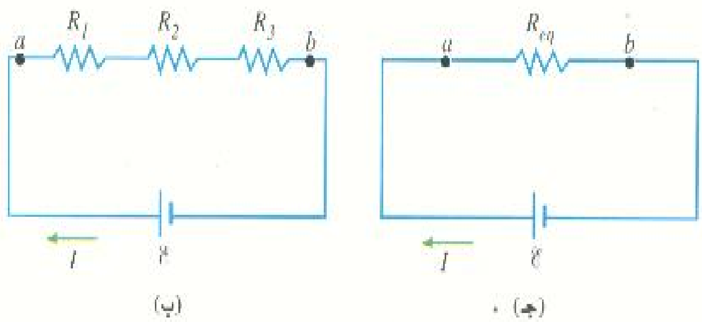
ويوضح الشكل 16–18 (أ) ثلاثة مقاومات متصلة معًا على التوالى وعندما تتصل ببطارية كما فى الشكل 16–18 (ب) فإن تيارًا ما I سيمر ونستطيع عمل الملاحظات التالية بناء على ما قد تعلمناه :

المقاومات على التوالى

1 يمر نفس التيار I خلال جميع المقاومات المتصلة على التوالى .

2 تكون انخفاضات الجهد عبر المقاومات هى IR_1 ، IR_2 و IR_3 ....





شكل 16–18:
تتصل المقاومات الثلاثة معا على التوالى والمقاومة المكافئة هى: $R_{eq} = R_1+R_2+R_3$.

وتعطينا قاعدة العروة لكيرتشوف عند تطبيقها على هذه الدائرة البسيطة ما يلى :

$$\mathscr{E} - IR_1 - IR_2 - IR_3 = 0$$

ومن ثم

$$\mathscr{E} = I\,(R_1 + R_2 + R_3)$$

وهدفنا هو إيجاد المقاومة المكافئة Req التي يمر خلالها نفس التيار I لو أنها وُصِّلت إلى نفس البطارية في الشكل 16-18 (جـ) . وقانون أوم يعطى عند تطبيقه على هذه الدائرة :

$$\mathscr{E} = I\,R_{eq}$$

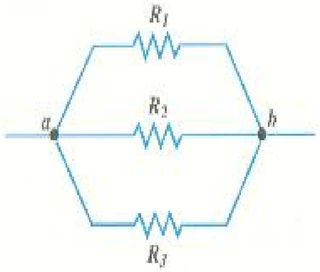
بمقارنة هاتين المعادلتين المعبرتين عن $\mathscr{E}$ نجد أن :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

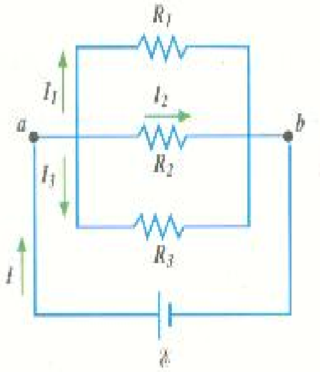
ويمكن تعميم هذه النتيجة بالنسبة لأى عدد n من المقاومات المتصلة على التوالي :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n \quad \text{على التوالي} \qquad (18\text{–}8)$$

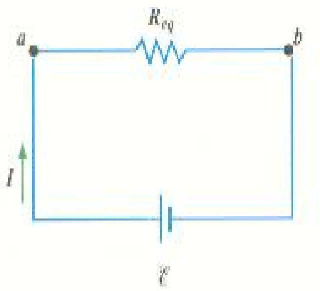
يوضح الشكل 17-18 (أ) ثلاثة مقاومات متصلة معًا على التوازى ، وعند توصيلها مع مصدر للقوة الدافعة الكهربية (emf) فإن نفس الفولطية (فرق الجهد) يكون مطبقًا عبر كل منها . ومرة أخرى نستطيع تطبيق ما تعلمناه لتونا لكي نستنتج ما يلى :



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل 17-18:
تتصل المقاومات الثلاثة معًا على التوازى . والمقاومة المكافئة هي
$1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$

المقاومات على التوازى

1 يكون فرق الجهد $\mathscr{E}$ عبر كل من المقاومات المتصلة معًا على التوازى هو نفسه .

2 يتعين التيار المار في كل مقاوم متصل مع آخرين على التوازى من العلاقة :

$I_1 = \mathscr{E}/R_1$ ، $I_2 = \mathscr{E}/R_2$ . . . إلخ

وطبقًا لقاعدة النقطة لكيرتشوف فإن :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{\mathscr{E}}{R_1} + \frac{\mathscr{E}}{R_2} + \frac{\mathscr{E}}{R_3}$$

ومرة أخرى نود أن نحدد قيمة R_{eq} التي تسحب تيارًا I من القوة الدافعة الكهربية $\mathscr{E}$ مساويًا للذى تسحبه المقاومات المتصلة على التوازى . أى أن

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_{eq}} = \frac{\mathscr{E}}{R_1} + \frac{\mathscr{E}}{R_2} + \frac{\mathscr{E}}{R_3}$$

مما يؤدى مباشرة إلى

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

وتعميم هذه القاعدة على عدد n من المقاومات المتصلة على التوازى هو :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \ldots + \frac{1}{R_n} \quad \text{على التوازى} \qquad (18\text{–}9)$$

ومن المثير ملاحظة أن المقاومات المتصلة على التوالي تتحد بنفس الطريقة التى تفعلها المكثفات المتصلة على التوازى والعكس صحيح . إن عليك ـ مرة أخرى ـ تذكر مراعاة الدقة عند جمع المقلوبات .

مثال توضيحي 6-18

أوجد التيار I المار خلال البطارية في الشكل 18-18 (أ) .

استدلال منطقي : قد نستطيع حل هذه المسألة بتطبيق قاعدتي كيرتشوف على دائرة كالمبينة في الجزء (أ) . على أنه يكون من الأبسط عادة أن ندمج المقاومات المتصلة معًا على التوالي وعلى التوازي قبل كتابة معادلات العروة وسنبدأ بدمج المقاومين اللذين بين النقطتين b و c :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{1}{6} + \frac{2}{6} = \frac{3}{6} \qquad , \qquad R = 2\,\Omega$$

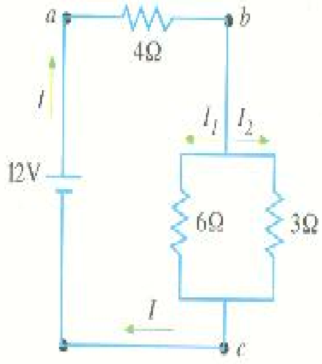
ويوضح الشكل 18-18 (ب) الآن الدائرة المكافئة .

حيث دمج المقاومان المتوازيان في مقاوم واحد . ومن الواضح الآن أن المقاوم $4\,\Omega$ والمقاوم $2\,\Omega$ متصلان على التوالي بين a و c ومقاومتهما المكافئة هي

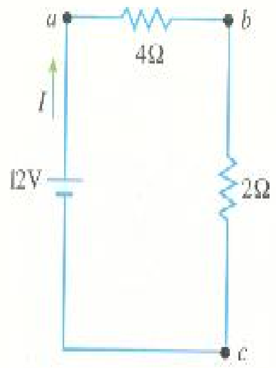
$$R\,eq = 4\,\Omega + 2\,\Omega = 6\,\Omega$$

والدائرة المكافئة الجديدة مرسومة في الجزء (جـ) من الشكل . وقد أصبح الموقف الآن صالحاً لتطبيق قانون أوم . إن فرق الجهد عبر المقاوم $6\,\Omega$ هو $12\,V$ ومن ثم :

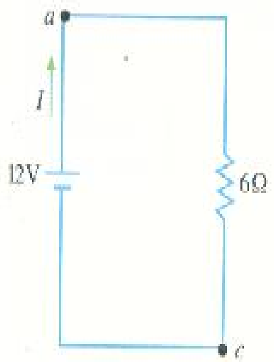
$$I = \frac{V}{R} = \frac{12V}{6\Omega} = 2\,A$$



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل 18-18: المقاومان المتوازيان بين b و c يكافئان مقاوم $2\,\Omega$ كما في الشكل (ب) . والمقاومان اللذان على التوالي في (ب) يمكن دمجهما كما في (جـ) .

مثال 4-18 :

أوجد التيار المار خلال البطارية في الشكل 19-18 (أ) .

استدلال منطقي :

سؤال : على أي شيء يعتمد التيار خلال البطارية ؟

الإجابة : بما أن $V = IR$ ، فلابد أن يعتمد التيار على فولطية البطارية (6 V) والمقاومة الكلية بين النقطتين a و d .

سؤال : ما هي المقاومة المكافئة بين النقطتين c و d ؟

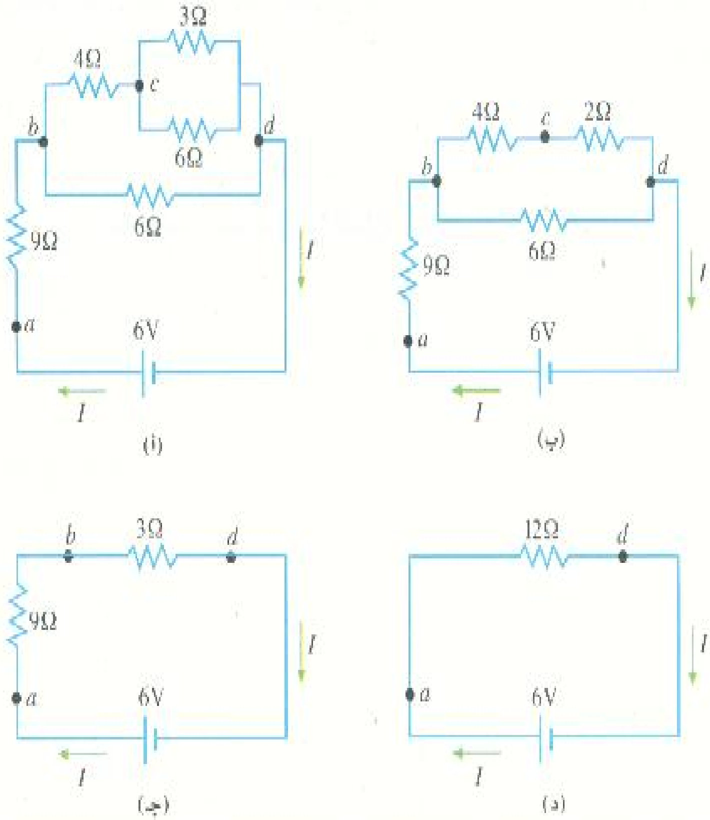
الإجابة : المقاومتان متصلتان على التوازي .

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{3}{6} \qquad , \qquad R_{cd} = 2\,\Omega$$

سؤال : ما هي المقاومة المكافئة بين b و d ؟

الإجابة : المقاومان $4\,\Omega$ و $2\,\Omega$ متصلان على التوالي مما يعني أنهما يكافئان مقاومًا $6\,\Omega$. وهذا الأخير متصل على التوازي مع مقاوم آخر $6\,\Omega$. ولهذا

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = \frac{2}{6} \qquad , \qquad R_{bd} = 3\,\Omega$$



شكل 19–18:
الدائرة المركبة فى (أ) يمكن اختزالها فى النهاية إلى الدائرة المكافئة البسيطة المبينـــة فى (د) .

سؤال : ما هى المقاومة الكلية بين a و d ؟

الإجابة : يتضح من الجزء (جـ) مـن الشكـل أن المقـاوم $9\ \Omega$ متصـل علـى التـوالى مـع المقاومة R_{bd} التى هى $3\ \Omega$. ولذا

$$R_{\text{tot}} = 9\ \Omega + 3\ \Omega = 12\ \Omega$$

الحل والمناقشة : ينص قانون أوم على :

$$I = \frac{V}{R_{\text{tot}}} = \frac{6V}{12\Omega} = 0.50\ \text{A}$$

18-9 مسائل على حل الدوائر

لقد أصبح تحت أيدينا الآن الأدوات اللازمة لحل معظم مسائل دوائر التيار المستمر . وقبـل أن تستخدم هـذه الأدوات في عـدد مـن الأمثلة ، علينا أن نسرد بعض الحقائق الواجب تذكرها . وعلى الرغم من أن لكل مسألة ملامحها الخاصة بها ، إلا أن المدخـل العام التالى يكون مفيدًا دائمًا تقريبًا .

1 ارسم الدائرة .

2 حدد تيارًا (من حيث الرمز والاتجاه) لكل فرع مـن أفـرع الدائـرة . واحـرص علـى استخدام رمز واحد للتيار فى فرع معين حتى وإن كان يحتـوى علـى عـدة عنـاصر . وعند كل نقطة التقاء لابد أن تحمل التيارات فى كل فرع رقمًا يختلف عن الآخرين .

3 اختزل المجموعات المتصلة على التوالى وعلى التوازى كلما أمكن ذلك وكلما كان متاحًا .

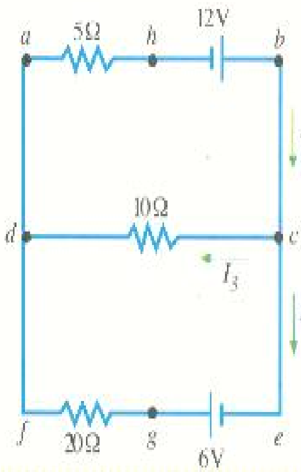
4 اكتب معادلات العروة بالنسبة للدائرة المبسطة ، ولابد أن تحتوى كل معادلة على معلومة من فرع واحد جديد على الأقل .

5 اكتب معادلات النقط بالنسبة لكل نقطة تحتوى على الأقل على تيار واحد جديد .

الخطوتان 4 و 5 يجب أن يتيحا لك عددًا من المعادلات بعدد المجاهيل فى الدائرة . قم الآن بحل هذه المعادلات آنيًا لتحصل على المجاهيل .

مثال 18-5 :

أوجد التيارات الثلاثة فى الدائرة الموضحة فى الشكل 20-18 .



شكل 20-18:
دائرة يسهل حلها باستخدام قاعدتى كيرتشوف .

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكننى تبسيط أى مجموعة متصلة على التوالى أو التوازى ؟

الإجابة : لا . فالمقاومان فى الفرعين *ab* و *ef* ليسا فى اتصال بسيط على التوازى مع *cd* . إذا يحتوى هذان الفراعان على بطاريات أيضًا .

سؤال : أى معادلات العروة يمكننى كتابتها ؟

الإجابة : إحدى هذه العرى هى *abcda* . فإذا بدأنا عند النقطة *a* فإن :

$$-I_1(5\ \Omega)+12\ V-I_3(10\ \Omega)=0 \qquad (1)$$

وهناك عروة أخرى هى *abefa* . فإذا بدأنا عند النقطة *a* فإن :

$$-I_1(5\ \Omega)+12\ V+6\ V-I_2(20\ \Omega)=0 \qquad (2)$$

ويمكن تبسيطها لتصبح

$$-I_1(5\ \Omega)+18\ V-I_2(20\ \Omega)=0$$

لاحظ أن بعض الحدود فى (2) هى نفس الحدود فى (1) وإن هناك بعض الحدود الجديدة أيضًا .

سؤال : ماذا عن العروة *dcef* ؟

الإجابة : لن تحتوى معادلة هذه العروة على حدود جديـدة ، حيـث تشمـل المعادلتـان (1) و (2) كل عناصر الدائرة .

سؤال : ما هي معادلة النقطة عند c ؟

الإجابة :

$$I_1 = I_2 + I_3 \qquad (3)$$

سؤال : كيف أبدأ فى حل هذه المعادلات الثلاث ؟

الإجابة : ليست لدينا معادلات تحتوى على مجـهول واحـد فقـط ولـذا عليـك أن تبـدأ بإلغاء بعض المجاهيل عن طريق التعويض . استخدم المعادلة (3) ، مثلاً ، للتعويض عـن I_1 فى المعادلتين (1) و (2) :

$$-(I_2 + I_3)(5\ \Omega) + 12\ \text{V} - I_3(10\ \Omega) = 0 \qquad (4)$$

$$-(I_2 + I_3)(5\ \Omega) + 18\ \text{V} - I_2(20\ \Omega) = 0 \qquad (5)$$

ويعطينا دمج الحدود معًا :

$$-I_2(5\ \Omega) - I_3(5\ \Omega) + 12\ \text{V} = 0 \qquad (6)$$

$$-I_2(25\ \Omega) - I_3(5\ \Omega) + 18\ \text{V} = 0 \qquad (7)$$

ويمكن حل المعادلة (6) للحصول على I_2 . بدلالة I_3 :

$$I_2 = 2.4\ \text{V}/\Omega = -3\,I_3$$

وبالتعويض من هذا فى المعادلة (7) والحل بحثًا عن I_3 ، ثم استخدام هذه القيمة فى المعادلة (8) فإننا نحصل على I_2 . وأخيرًا فإن I_1 تنتج من المعادلة (3) .

الحل والمناقشة : عندما تحتفظ بعملك منمقًا ومنهجيًا ، فـإنك بذلـك تقلـل مـن مخـاطر الأخطاء الجبرية التى تحدث عند حل المعادلات الآنية . من المعادلة (7) نجد :

$$-60\ \text{V} + I_3(75\ \Omega) - I_3(5\ \Omega) + 18\ \text{V} = 0, \qquad I_3 = 0.600\ \text{A}$$

ثم تعطينا المعادلة (8) ما يأتى

$$I_2 = 2.4\ \text{V}/\Omega - (0.600\ \text{A})(3) = 0.600\ \text{A}$$

وفى النهاية ، تعطينا المعادلة (3) ،

$$I_1 = 0.600\ \text{A} + 0.600\ \text{A} = 1.200\ \text{A}$$

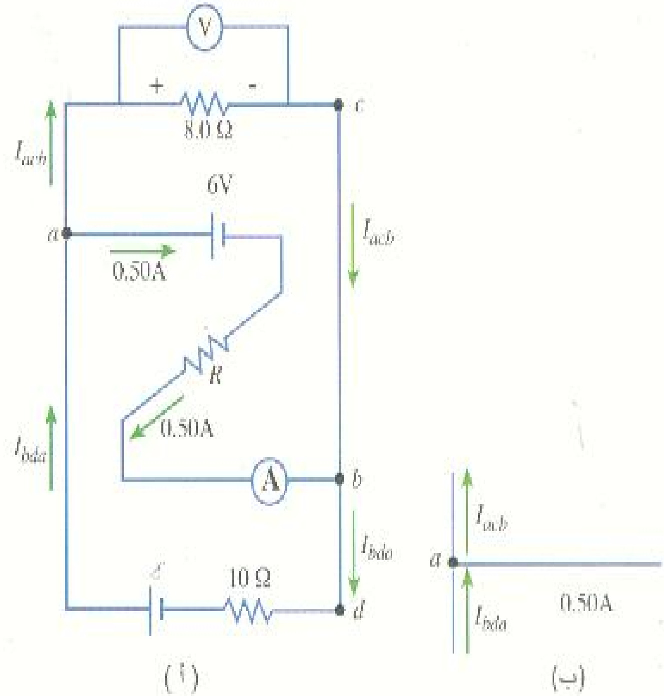
لاحظ أن جميع التيارات ذات قيم موجبة مشـيرة بذلـك إلى أن اتجاهاتـها قـد اختـيرت بشكل صحيح .

تدريب : احسب فرق الجهد بين النقطتين e و f فى الشكل 20-18 . **الإجابة** : 6V- .

مثال 6-18 :

تحتوى الدائرة المرسومة فى الشكـل 21-18 (أ) علـى رمزيـن جديديـن همـا Ⓥ و Ⓐ

يمثلان فولتميتر وأميتر على الترتيب . وسوف يناقش عمل هذين الجهازين بتفصيل أكبر في القسم 18-10 . أما الآن فعليك اعتبار أن الفولتميتر يقرأ فرق الجهد عبر المقاوم $8.0\ \Omega$ بينما يقرأ الأميتر التيار I_{ab} الذي يسري في الفرع ab . وهذه القراءات هي على الترتيب $16\ V$ و $0.50\ A$. وقطبية المقاوم $8\ \Omega$ واتجاه التيار $0.5\ A$ موضحان بالرسم . وسنعتبر وجود الجهازين غير مؤثر إطلاقاً في عمل الدائرة . أوجد قيم كل من $\mathscr{E}$ ، R ، I_{acb} و I_{bda} كما يشار إليها في الشكل 18-21 (أ) . أما الشكل 18-21 (ب) فيوضح نقطة التقاء التيارات عند a .



شكل 18-21:
قراءة كل من الأميتر والفولتميتر معلومة . ونرغب في إيجاد R ، I و $\mathscr{E}$.

استدلال منطقي :

سؤال : تحتوي المسألة على أربعة مجاهيل ولذا سأحتاج إلى أربع معادلات لحل المسألة . من أين آتي بكل هذه المعادلات ؟

الإجابة : إن لديك من المعلومات ما يكفي لإيجاد I_{acb} على الفور . ثم عليك تطبيق قاعدتي كيرتشوف على كل نقطة وكل عروة حتى تكون ثلاث معادلات مستقلة .

سؤال : كيف يرتبط التيار I_{acb} بالجهد المقاس عبر المقاوم $8\ \Omega$ ؟

الإجابة : إن فرق الجهد عبر المقاوم هو $V = IR$. وهنا $V = 16\ V$ و $R = 8.0\ \Omega$ ولهذا يكون التيار $I_{acb} = V/R = 2.0\ A$.

سؤال : ما هي نتيجة تطبيق قاعدة النقطة على a ؟

الإجابة : بالرجوع إلى الشكل 18-21 (ب) نجد أن التيار I_{bda} يدخل النقطة a بينما يغادرها التياران I_{acb} و $0.50\ A$. ولذا

$$I_{bda} = 2.0\ A + 0.50\ A = 2.5\ A$$

سؤال : هل أشتق معادلة ثانية إذا استخدمت قاعدة النقطة عند b ؟

الإجابة : إن النقطة b سوف تعطيك نفس المعادلة التى قدمتها لك النقطة a أى أنه لن تظهر بها أية تيارات جديدة .

سؤال : ماذا ينتج عن تطبيق قاعدة العروة على العروة $acba$ ؟

وأيضًا كيف اختار الاتجاه الذى أتحرك فيه حول العروة ؟

الإجابة : يمكنك اختيار أى من الاتجاهين المكنين لتتحرك حول العروة . فطالما أنك تراعى الإشارات الصحيحة لتغيرات الجهد فإنك ستحصل على نفس النتيجة . فإذا اخترت اتجاه حركة عقارب الساعة مثلاً ، فإنك تحصل على :

$$-16\ \text{V} + (0.50\ \text{A})\,R + 6.0\ \text{V} = 0 \qquad (1)$$

لاحظ أن بهذه المعادلة مجهول واحد فحسب وهو R . وعليك التأكد من أنك تفهم الإشارات .

سؤال : ما العروة التى على اختيارها بعد ذلك ؟

الإجابة : إن أيًا من العروتين المتبقيتين $acbda$ أو $abda$ سوف تكمل المسألة ، لأن جميع أفرع الدائرة حينئذ ستكون قد استخدمت فى المعادلات .

سؤال : ما الذى يتيحه الدوران حول العروة $acbda$ ؟

الإجابة : إذا بدأت من النقطة a فإنك تحصل على :

$$-16\ \text{V} - (I_{bda})\,(10\ \Omega) + \mathscr{E} = 0 \qquad (2)$$

وبما أن قاعدة النقطة قد أعطتك بالفعل قيمة I_{bda} ، فإن هذه المعادلة يمكن حلها للحصول على $\mathscr{E}$.

الحل والمناقشة : فى المعادلة (1) يدخل فرق الجهد عبر R بإشارة موجبة لأننا إذا سرنا حول العروة باتجاه حركة عقارب الساعة فإننا نخترق R فى اتجاه عكس اتجاه التيار ولذا فإننا نسير فى اتجاه زيادة الجهد . والمعادلة (1) تعطينا $R = (10\ \text{V})/(0.5\ \text{A}) = 20\ \Omega$ ، أما المعادلة (2) فتعطينا $\mathscr{E} = 16\ \text{V} + (2.5\ \text{A})\,(10\ \Omega) = 41\ \text{V}$.

مثال 18-7 :

بالنسبة للدائرة المرسومة فى الشكل 22-18 ، أوجد I_1 ، I_2 ، I_3 والشحنة التى على المكثف .

استدلال منطقى :

1

سؤال : كيف يظهر المكثف فى قاعدتى كيرتشوف ؟

الإجابة : عندما يتم شحن المكثف فإن التيار لا يستطيع المرور خلال الفرع الذى به المكثف . (لاحظ أن التيار $I_4 = 0$ فى الشكل 22-18) . ومن المعادلة 6-17 فإن فرق الجهد عبر المكثف يرتبط بشحنته بالعلاقة $V = q/C$. وعندما يتم تحليل بقية الدائرة

فإن بإمكانك أن تجد V ومن ثم q .

سؤال : ماذا تقدم قاعدة النقطة بالنسبة للنقطة d ؟

الإجابة : $I_2 = I_1 + I_3$.

سؤال : ما الذى تقدمه قاعدة العروة بالنسبة للعروة $abcda$ ؟

الإجابة : إذا تحركت فى اتجاه ضد اتجاه حركة عقارب الساعة فإنك تحصل على :

$$-I_3(8\ \Omega) + 12\ V + 4\ V = 0 .$$

ومن ثم $I_3 = 2.00\ A$

سؤال : ما الذى تعطيه العروة $badeb$ ؟

الإجابة : إذا تحركت فى اتجاه حركة عقارب الساعة فإن :

$$+(2.00\ A)(8\ \Omega) - 4\ V - I_1(6\ \Omega) = 0$$

ولذا $I_1 = 2.00\ A$.

سؤال : ما هى المعادلة التى تعطينى I_2 ؟

الإجابة : إنها قاعدة النقطة . فالنقطة b ، مثلاً ، تشير إلى أن

$$I_2 = I_1 + I_3 = 4.00\ A$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تتيح الحصول على الشحنة على المكثف ؟

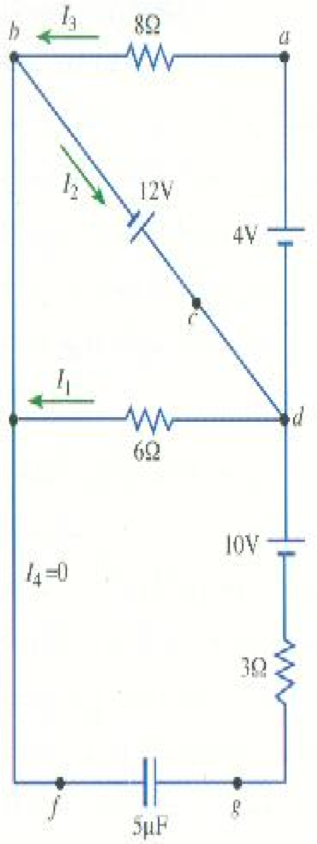
الإجابة : عليك بتطبيق قاعدة العروة على العروة المحتوية على المكثف على الرغم من أن التيار فى الفرع المحتوى على المكثف (I_4) لابد أن يكون صفرًا . وعليك التحرك ، مثلاً ، ضد اتجاه عقارب الساعة حول العروة $defgd$.

سؤال : إذا كانت I_4 صفرًا فهل معنى ذلك أنه لا يوجد تغير فى الجهد عبر المقاوم $3\ \Omega$ ؟

الإجابة : نعم .

سؤال : كيف أستطيع تحديد اتجاه تغير الجهد عبر المكثف ؟

الإجابة : لست بحاجة لأن تعرف حتى تكتب المعادلة . وكل ما عليك هو استخدام الرمز V_{fg} للإشارة إلى تغير الجهد من f إلى g . وعندما تجد الحل فإن إشارة V_{fg} سوف تدل على اتجاه تغير الجهد .



شكل 22-18:
عندما يكون المكثف مشحونًا تمامًا ، فإن التيار المار خلال السلك السفلى يكون صفرًا ويمكن إهمال هذا الجزء من الدائرة .

الحل والمناقشة : تعطينا قاعدة العروة بالنسبة للعروة $defgd$ ما يلى

$$-(2.00\ A)(6.0\ \Omega) + V_{fg} + 10\ V = 0$$

ولذا فإن $V_{fg} = 2.0\ V$

ولابد أن تكون الشحنة على المكثف هى

$$q = Cv_{fg} = (5.0 \times 10^{-6}\ F)(2.0\ V) = 1.0 \times 10^{-5}\ C$$

لاحظ أن اللوح المتصل بالنقطة g هو اللوح الموجب للمكثف .

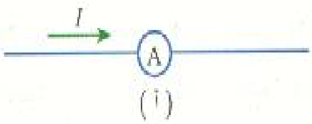
18-10 الأميترات والفولتميترات

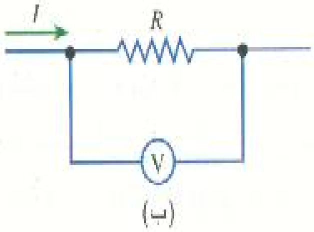
رأينا فى المثال 6-18 حالة نموذجية حيث استخدم أميتر وفولتميتر فى الدائرة . وعلى الرغم من أننا سنعرف تركيب هذه الأجهزة فى الفصل التاسع عشر ، إلا أننا لن نؤجل مناقشة كيفية استخدامها لأنك سوف تستخدمهما فى المعمل .



نستخدم كلاً من الأجهزة الرقمية والتناظرية لقياس التيار وفرق الجهد .

يستخدم الأميتر فى قياس التيار المار فى سلك ما . ويتم توصيله مباشرة فى خط واحد مع السلك كما هو موضح فى الشكل 23-18 (أ) . لاحظ أن التيار المراد قياسه يمر من خلال الجهاز . فإذا كان للجهاز مقاومة كبيرة فإنه سيغير من قيمة التيار . وعلى هذا فإن مقاومة الأميتر المثالى تكون صفرًا . أما ما تستخدمه فى المعمل من أميترات ـ فى العادة ـ فإن مقاومتها تكون كسرًا من الأوم .





شكل 23-18:
لماذا وجب أن يكون للأميتر مقاومة ضئيلة وللفولتميتر مقاومة لانهائية تقريبًا ؟

وتستخدم الفولتميترات فى قياس فرق الجهد . ولقياس فرق الجهد $V = IR$ عبر المقاوم فى الشكل 23-18 (ب) فإن طرفى الفولتميتر لابد وأن يتصلا بنهايتى المقاوم بالطريقة الموضحة بالشكل . ومن الناحية المثالية فإننا نود للفولتميتر أن يدع الدائرة غير مضطربة . وهذا الأمر ممكن لو أن مقاومة الفولتميتر كبيرة جدًا . والفولتميتر المثالى تكون مقاومته لانهائية بحيث لا يمكن للتيار المار فى الدائرة أن يتفرع عند نقطة توصيل الجهاز .

ويواجه الطلاب الذين يخلطون بين الأميتر والفولتميتر فى مواقف كالمبينة فى الشكل 23-18 خطرًا حقيقيًا على الحياة والسعادة بسبب الاستياء الشديد الذى سيبديه مدرس المعمل لديهم . فالفولتميتر المثالى مقاومته لانهائية . أى أنه لن يمر تيار خلاله عند توصيل طرفيه إلى نقطتين تختلفان اختلافًا كبيرًا فى الجهد . أما الأميتر المثالى فإن مقاومته صفرية ، ولو أن طرفيه وصلا سهوًا إلى نقطتين جهداهما مختلفان فإن التيار خلال الأميتر سوف يعطى بالعلاقة

$$I = \frac{V}{R} = \frac{\text{أى مقدار}}{\text{صفر}} \to \infty$$

ويكون خطأ الطالب فى هذه الحالة مصحوبًا بالدخان المنبعث من علبة الجهاز وبضرر لا يمكن إصلاحه للجهاز وبموقف عدائى من جانب المدرس . لذا يجب الاحتراس .

18-11 الدوائر المنزلية

لاشك أننا معتادون على وجود الدوائر الكهربية الممتدة داخل منازلنا . فشركات توزيع القوى الكهربية تقوم بمد سلكين على الأقل إلى كل منزل لإمداده بفرق للجهد مقداره نحو 120 V* . ويكون لأسلاك التوصيل هذه عادة قطر كبير حتى تحمل تيارًا كبيرًا دون أن ترتفع درجة حرارتها . (كلما كانت مساحة المقطع المستعرض للسلك كبيرة كلما قلت مقاومته . وحيث أن الحرارة المتولدة تتناسب مع I^2R ، فإن المقاومة المنخفضة تضمن تبددًا أقل للحرارة) .

وفى معظم البيوت الأحدث تصنع الأسلاك بحيث تتحمل تيارات تصل إلى 20 A دون حدوث تسخين غير مطلوب على أنه للوقاية من التيارات الكبيرة يوصل مصهر (فيوز) أو قاطع للدائرة على التوالى مع السلك . وتكون مهمته فصل السلك تلقائيًا عن مصدر الجهد لو سحب تيار أكبر من المسموح به من المصدر .

وتتكون دائرة منزل تقليدية من سلكين متوازيين ممتدين خلال المنزل من المصدر ذى الجهد 120 V والذى يصل إلى المنزل عن طريق الأسلاك « الواصلة » (الشكل 18-24) . ويتصل أحد أطراف كل بصيلة إضاءة أو جهاز ما أو غيرها بالسلك ذى الجهد العالى ، أما الطرف الآخر فيتصل بالسلك ذى الجهد المنخفض . وعندما يغلق مفتاح جهاز ما فإن الشحنات يمكنها التدفق خلال الجهاز . والسلك ذو الجهد المنخفض يتصل عادة بالأرض .

ولكثير من الأجهزة التى تعمل بجهد مقداره 120 V أصبع ثالثة بالقابس تقوم بالتوصيل بين سلك الأرضى والإطار المعدنى للجهاز . فإذا مس سلك الجهد المرتفع الإطار المعدنى بالصدفة لحدث اتصال مباشر بالأرض وهنا يمر تيار كبير من خلال سلك الجهد المرتفع إلى الأرض وتكون النتيجة أن ينقطع سلك المصهر (الفيوز) المتصل بسلك الجهد المرتفع . أما إذا لم يكن هناك سلك أرضى فإن هذا الخلل يؤدى إلى أن يصبح الجهاز « طافيًا » عند جهد مرتفع . حتى إذا مس أى شخص الإطار المعدنى فإنه يصاب بصدمة .

سنحسب الآن مقدار التيار الذى تسحبه بصيلة شدتها 60 W كالمبينة فى الشكل 18-24 عند إضاءتها . بما أن القدرة تساوى VI وبما أن $P = 60\ W$ وكان فرق الجهد



شكل 18-24:
عند غلق مفتاح ما ، فإن التيار يمر خلال الجهاز المتصل بذلك المفتاح .

* يعكس فرق الجهد الذى توفره شركات القوى الكهربية اتجاهه باستمرار على هيئة دالة جيبية . وسندرس هذا النوع من الفولطية بالتفصيل فى الفصل الحادى والعشرين . أما فى ما يخص الجزء الحالى فإن الجهد المتردد له تأثير يشبه ذلك الذى للجهد المستمر (dc) .

فى هذه الحالة 120 V فإن التيار المار فى البصيلة $I = 0.500\ A$. وبالمثل ، عندما تدار محمصة الخبز فإنها تسحب تيارًا مقداره 10.0 A ، ويسحب جهاز الراديو 0.167 A أما البصيلة التى شدتها 120 W فإنها تسحب 1.00 A . وإذا أديرت كل هذه الأشياء معًا فإن ما مجموعه 11.667 A من التيار سيمر خلال المصهر . وتتصل دائرة المنزل عادة بمصهر لا يقل عن 15 A ولذا لن يكون هناك خطر فى هذه الحالة .

والمنزل الذى به العديد من الأجهزة الكهربائية ، يحتاج إلى أكثر من دائرة . ولأغلب المنازل دوائر عديدة منفصلة عن بعضها البعض ، ولكل دائرة مصهرها الخاص بها يشبه الموضح فى الشكل 24-18 .

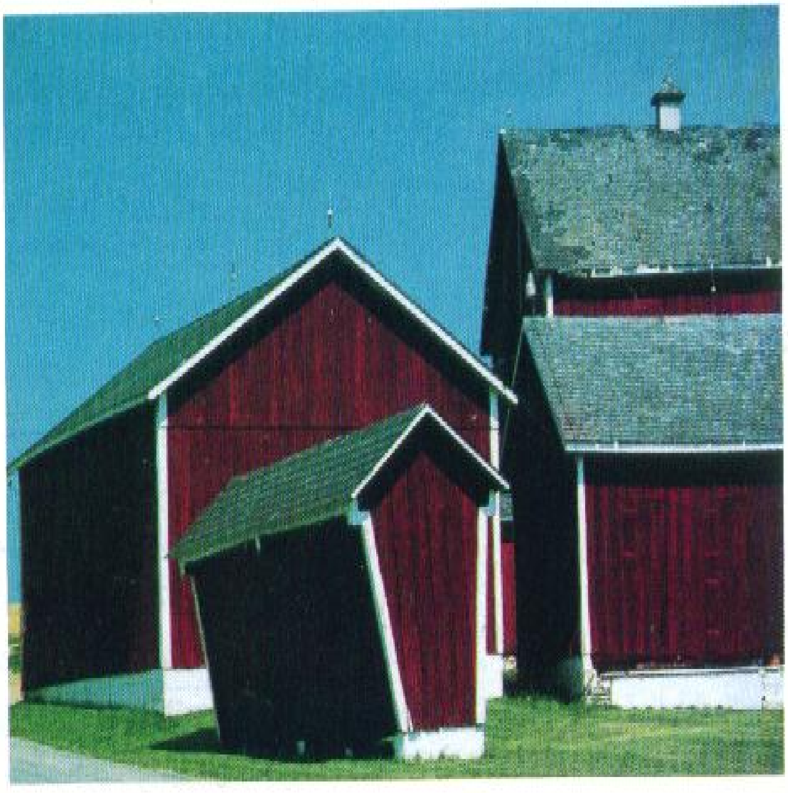
ومن الشيق حساب مقاومة بصيلة إضاءة . عندما تكون البصيلة باردة فإن مقاومتها لا تكون كبيرة جدًا . على أنها إذا وصلت بمصدر الجهد المقرر وهو عادة 120 V فإن عنصر المقاومة يصبح ساخنًا إلى درجة الإبيضاض . وكما درسنا من قبل فإن مقاومتها تزداد بشكل ملموس كلما ارتفعت درجة حرارتها ، وعندما تكون البصيلة ساخنة فإنها عندئذ تعمل عند نفس قيمة القدرة بالوات المسجلة عليها . فإذا فرضنا أن لدينا بصيلة مطبوعًا عليها 60 W ، 120 V ، فإننا نعرف أن :

$$P = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$60\ \text{W} = \frac{(120\ \text{V})^2}{R}$$

$$R = 240\ \Omega$$

فى حين إننا قد رأينا فى المثال 1-18 أن مقاومة هذه البصيلة عند درجة حرارة الغرفة نحو 27 Ω .



تتصل قضبان البرق المثبتة على قمم هذه المبانى الريفية بالأرض بواسطة أسلاك كالتى ترى عند الحافة اليمنى للمبنى الذى على يمين الصورة . وتسمح الأطراف المدببة لهذه القضبان للشحنة المستحثة بداخلها بواسطة السحب أن تتسرب وبذلك تمنع تراكم الشحنات وتقلل من احتمالات التدمير المفاجئ لضربات البرق . وفى حالة ما إذا ضرب البرق المبنى بالفعل فإنه يتجه أولاً إلى القضيب فتتخذ الشحنة طريقًا إلى الأرض وبذلك تتم حماية المبنى من التدمير الشديد .

18-12 الأمان الكهربى

حيث أننا نستخدم الأجهزة الكهربائية كل يوم ، فإن علينا أن نفهم قواعد الأمان الكهربى . فهناك طريقتان يمكن للكهرباء أن تقتل إنسانًا من خلالهما . فالكهرباء قد تتلف عضلات القلب والرئتين (أو أى أعضاء حيوية أخرى) أو قد تحدث حروقًا قاتلة . بل إنه حتى التيار الصغير قادر على إفساد وظائف الخلية فى ذلك الجزء من الجسد الذى يمر التيار من خلاله . وعندما يكون التيار 0.001 A أو أكبر فإن الشخص يستطيع الإحساس بالصدمة . أما عند تيار شدته 0.01 A فإن الشخص لا يستطيع أن يفلت السلك الكهربائى من يده لأن التيار يجعل عضلات اليد تتقلص بشدة . وإذا وصل التيار إلى 0.02 A ومر خلال الجزء فإنه يسبب شللاً لعضلات الجهاز التنفسى فيتوقف التنفس . وما لم يسعف المصاب فورًا بإجراء تنفس صناعى فإنه يختنق . ومن الطبيعى أن تخلص الضحية من مصدر الجهد قبل أن يمسه أى إنسان ، وإلا كان المنقذ نفسه معرضًا لخطر عظيم . وعندما يمر تيار شدته نحو 0.1 A خلال منطقة القلب فإن عضلات القلب تصدم بتقلصات سريعة وغير منتظمة (أو ما يطلق عليه اختلاجات بطينية) لدرجة أن القلب لا يمكنه العمل بعد ذلك وفى النهاية فإن تيارات شدتها 1 A أو أكثر تحدث حروقًا خطيرة بأنسجة الجسم التى تمر خلالها .

ولكى نمنع الضرر **فإن الكمية المهمة التى يجب التحكم فيها هى التيار . أما الجهد فهو مهم فقط لأنه يجعل الشحنات تسرى .** وعلى الرغم من أن جسدك قد يشحن حتى يصل الجهد إلى عدة آلاف من الفولتات أعلى من جهد معدن جسم السيارة عندما تنزلق على مقعد السيارة ، إلا أنك لا تشعر إلا بوخزة غير ضارة عندما تلمس مقبض الباب . والواقع ، أن جسدك لا يمكن أن يحتفظ بشحنة كبيرة عليه ولهذا فإن التيار المار من يدك إلى مقبض الباب لا يستغرق سوى وقت قصير ، مما يجعل تأثيره على خلايا جسدك ضئيلاً .

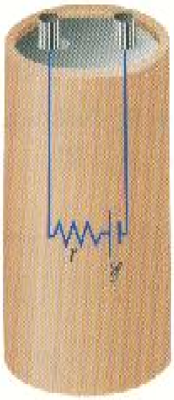
وفى بعض الظروف ، فإن دائرة منزلية جهدها 120 V تسبب غالبًا الموت المؤكد . وعادة ما يوصَّل أحد سلكى الدائرة بالأرض ولذا يكون دائمًا عند نفس جهد أنابيب المياه بالمنزل . افترض أنك غمرت جسدك فى حوض الاستحمام بالمنزل (البانيو) ، بحيث يكون جسدك متصلاً - عمليًا - بالأرض من خلال مياه الاستحمام والأنابيب ؛ فإذا لمست يدك مصادفة السلك ذى الجهد المرتفع فى دائرة المنزل (وذلك عند لمس سلك مكشوف داخل راديو أو سخان كهربائى ، مثلاً) فإن الشحنة تتدفق خلال جسدك إلى الأرض . ونتيجة للاتصال الجيد والكفء بين جسدك والأرض فإن مقاومة الجسد تكون منخفضة ؛ وبالتالى فإن التيار المتدفق خلال الجسد يكون كبيرًا لدرجة تعرضك للصعق بالكهرباء .

وقد تحدث مواقف مشابهة فى أماكن أخرى . فعلى سبيل المثال ، لو أنك لمست مصادفة سلكًا مكشوفًا ، حال وقوفك على الأرض بأقدام مبتلة ، فإنك تكون معرضًا لخطر أكبر بكثير مما لو كنت واقفًا فوق سطح جاف وعازل ؛ وذلك لأن الدائرة الكهربية المارة

من خلال جسدك إلى الأرض ذات مقاومة أكبر بكثير لو كانت أقدامك جافة. وبالمثل ، لو أنك تعرضت لصدمة كهربية عند لمسك لسلك عار أو أحد الأجهزة التى بها خلل ، ستكون الصدمة أشد وأقسى لو كانت يدك الأخرى تقبض على صنبور الماء أو مغمورة فى الماء .

وكما هو واضح من هذه الأمثلة فإن خطر الصدمة الكهربية يمكن تلافيه إذا تجنبنا مرور التيار خلال أجسادنا . فإذا زاد فرق الجهد عن 50 V فإن عليك تجنب لمس أى جزء معدنى مكشوف من الدائرة . ولو كان عليك أن تمس سلكًا عند جهد مرتفع ، مثلاً ، وذلك إذا وقعت مشكلة فى خط القدرة الكهربية ولم تكن النجدة متاحة على الفور ، فيمكنك عندئذ إبعاد السلك باستخدام عصا جافة أو أية مادة عازلة أخرى . فإذا خامرك الشك فيما يتعلق بالسلامة فتجنب أى تلامس أو اقتراب من أى جسم معدنى أو أرض مبللة . **وفوق كل ذلك لا تجعل جسدك حلقة وصل بين نقطتين عند جهدين مختلفين اختلافًا شديدًا .**

18-13 القوة الدافعة الكهربية (EMF) والجهد الطرفى للبطارية

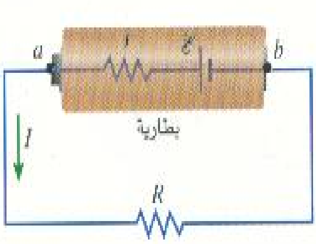


شكل 25-18:
تعمل البطارية كما لو كانت مؤلفة من قوة دافعة كهربية (emf) نقية ($R = 0$) ومتصل معها مقاوم على التوالى .

من المحتمل أن يكون كل منا قد لاحظ فى وقت ما أو آخر ، أن أضواء السيارة تخفت عند إدارة المحرك . والسبب فى هذا هو أن البادئ الكهربى يسحب تيارًا كبيرًا من البطارية ، وهو بهذا يقلل من الجهد بين طرفى البطارية فتخفت أضواء السيارة وسنقوم الآن بدراسة عدم ثبات فرق الجهد الطرفى للبطارية .

لقد أشرنا فى الفصل السابع عشر إلى أن (emf) للبطارية تتولد من التفاعل الكيميائى داخل البطارية . على أن البطارية أداة كيميائية معقدة جدًا ولا يمكن للشحنة أن تتحرك بداخلها دون أن تواجه مقاومة داخلية . ونتيجة لهذا تتصرف البطارية فى دائرة ما على أنها مصدر نقى للقوة الدافعة الكهربية ($R = 0$) متصل على التوالى مع مقاوم . ويوضح الشكل 25–18 هذه المقاومة الداخلية r وعنصر الدائرة المكافئ للبطارية .

لاحظ أنه عندما لا يسحب تيار من البطارية ، فإنه لن يدخل فرق للجهد عبر المقاومة الداخلية r . ومن ثم يكون فرق الجهد بين طرفيها مساويًا لقوتها الدافعة الكهربية . على أنه لو وصلت البطارية عبر مقاوم خارجى ، كما فى الشكل 26-18 فإن التيار يكون I . وفرق الجهد عبر الطرفين هو



شكل 26-18:
فرق الجهد عبر طرفى البطارية هو $\mathcal{E} - Ir$.

الجهد الطرفى = $V_T = \mathcal{E} - Ir$ = (أثناء التفريغ)

وإذا كانت البطارية تمر بعملية شحن ، أى لو كان التيار يتدفق خلال البطارية من الطرف الموجب إلى الطرف السالب فإن :

الجهد الطرفى = $V_T = \mathcal{E} + Ir$ = (أثناء الشحن)

وبالنسبة لبطارية جيدة قوتها 12 V ، فإن مقاومتها الداخلية لا تتجاوز نحو 0.01 Ω وعند توصيل هذه البطارية عبر مقاوم 3 Ω فإن :

$$I = \frac{12\ V}{3\ \Omega + 0.01\ \Omega} \approx 4\ A$$

والجهد الطرفي V_T هو فرق الجهد بين النقطتين a و b :

$$V_T = 12\ V - (4\ A)\ (0.01\ \Omega) = 11.96\ V$$

وفي هذه الحالة فإن الجهد الطرفي مساوٍ تقريبًا للقوة الدافعة الكهربية .

على أنه كلما تقدم العمر بالبطارية ، كلما زادت مقاومتها الداخلية ؛ ولو أن المقاومة الداخلية للبطارية زادت حتى صارت $1.0\ \Omega$ فإن التيار الذي يمر في مقاومة $3\ \Omega$ متصلة بالبطارية يصبح :

$$I = \frac{12\ V}{4\ \Omega} = 3.0\ A$$

أما الجهد الطرفي فيكون

$$V_T = 12\ V - 3.0\ V = 9.0\ V$$

ولابد أن يكون واضحًا ، أنه عند تشغيل بادئ الحركة فإن السيارة تسحب نحو $100\ A$ من البطارية ، وعندئذ ينخفض الجهد الطرفي للبطارية ـ حتى وإن كانت جديدة ـ بشكل ملحوظ .

مثال 18-8 :

ما هو الجهد الطرفي لكلٍ من البطاريتين في الشكل 27-18 ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما الذي علي أن أعرفه لتعيين الجهود الطرفية ؟

الإجابة : بما أنك تعرف المقاومتين الداخليتين فيمكنك حساب الجهد بين الطرفين لو استطعت إيجاد التيار المار خلال البطاريتين .

سؤال : ما موقف قاعدة العروة لكيرتشوف من هذه الدائرة ؟

الإجابة : إذا سرنا حول الدائرة في اتجاه حركة عقارب الساعة ، بادئين من النقطة a :

$$-6\ V - I(0.90\ \Omega) - I(8\ \Omega) - I(0.10\ \Omega + 24\ V) = 0$$

ومن ثم ،

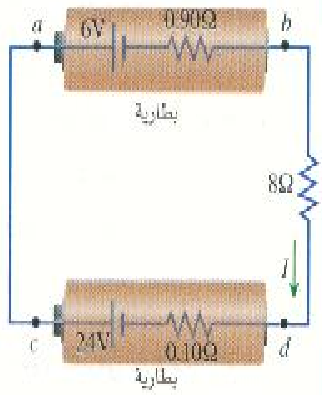
$$I = \frac{18\ V}{9.0\ \Omega} = 2.00\ A$$

سؤال : ما هي معادلة الجهد الطرفي ؟

الإجابة : $V_T = \mathscr{E} + Ir$. ولك أن تستخدم الإشارة الموجبة لو كانت البطارية تشحن . والإشارة السالبة عند تكون البطارية في حالة تفريغ (أي تدفع بتيار في الدائرة) .

الحل والمناقشة : بالنسبة للبطارية $24\ V$:

$$V_T = 24\ V - (2\ A)(0.10\ \Omega) = 23.8\ V$$



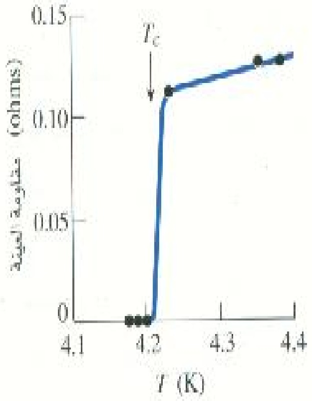
شكل 27-18:
تقوم البطارية 24 V بشحن البطارية 6 V . وسنجد أن فرق الجهد الطرفي لبطارية تتفرغ أقل من قوتها الدافعة الكهربية ، بينما يكون العكس هو الصحيح بالنسبة لبطارية تُشحن .

بالنسبة للبطارية 6 V التى تُشحن :

$$V_T = 6\ V + (2\ A)(0.9\ \Omega) = 7.8\ V$$

منظور حديث

الموصلية الفائقة



شكل 28-18:
انتقال الزئبق إلى حالة التوصيل الفائق كما سجله أونيس عام 1911 .

شهد مطلع القرن العشرين قدرًا كبيرًا من التكهنات حول سلوك المواد ، بما في ذلك ما يتعلق بمقاوميتها عند درجات حرارة تقترب من الصفر المطلق . ولنبدأ باسترجاع بعض ما عرفناه - بإيجاز - عن المقاومية أو المقاومة النوعية . فقد درسنا في القسم 2-18 أن المقاومية تنشأ من التصادمات بين الإلكترونات التى تكون التيار الكهربى وذرات المادة الموصلة . وعندما تتحرك الإلكترونات خلال الموصل ، فإن ما يحصلون عليه من طاقة بواسطة القوة الدافعة الكهربية في الدائرة ، تتحول إلى طاقة حرارية بفعل هذه التصادمات . ولاحظنا في القسم 4-18 أن مقاومية معظم المواد الموصلة تتناقص بانخفاض درجة الحرارة . وهنا نتساءل ، « هل تهبط المقاومية إلى الصفر لو أن الموصل يمكن تبريده حتى الصفر المطلق 0 K ؟ » .

وكانت أدنى درجة حرارة متاحة في المعمل حتى عام 1908 هي ما يوفرها الهيدروجين السائل ، الذى يكون سائلاً تحت الضغط الجوى من نحو 20 K إلى ما يقرب من 14 K حيث يأخذ الهيدروجين في التجمد . وقد أشارت الدلائل عند درجات حرارة أدنى من 25 K إلى أن مقاومية كثير من الفلزات تستمر في الانخفاض بانخفاض درجة الحرارة ، وإن كان معدل الانخفاض يكون أبطأ مما يحدث عند درجات الحرارة الأعلى . ثم حدث فتح كبير للوصول إلى درجات حرارة أدنى ، خلال عام 1908 عندما نجح الفيزيائى الهولندى كامرلنج أونس في إسالة الهليوم عند درجة حرارة 4.2 K .

جدول 4-18 :
أمثلة على الدرجات الحرجة للموصلية الفائقة

T_c (K)	المادة
	العناصر
0.01	التنجستين
0.40	التيتانيوم
1.19	الألومنيوم
4.15	الزئبق
7.18	الرصاص
9.46	النيوبيوم
	السبائك
4.25	50% نيكل - 50% بزموت
17.5	75% نيوديميوم - 25% ألومنيوم
18.0	75% نيوديميوم - 25% قصدير

وفي عام 1911 أنجز أونس اكتشافه المبهر بأنه بدلا من مواصلة الانخفاض المنتظم عند درجات حرارة الهليوم السائل ، فإن مقاومية الزئبق هبطت فجأة (بمعامل يزيد على 10^6 في مدى من انخفاض درجة الحرارة $\Delta T = 0.01$ K) إلى الصفر عند درجة حرارة تبلغ 4.15 K (الشكل 28-18) وقد وصف أونيس هذا الانتقال بأنه حالة جديدة للزئبق - وهى **حالة التوصيل الفائق** . وقد بات واضحًا في ما تلى ذلك من سنوات أن معظم الفلزات وعددًا كبيرًا من السبائك تُظهر هذا النوع من الانتقال المفاجئ إلى المقاومية الصفرية عند درجات حرارة مختلفة (تسمى درجات الحرارة **الحرجة** ، T_c) . ويتضمن الجدول 4-18 قائمة موجزة لدرجات الحرارة الحرجة .

ثم مضى أونيس في عمله فابتكر اختبارًا حساسًا للغاية يمكنه من تحديد ما إذا كانت مقاومية الموصل الفائق صفرًا فعلاً أم أنها صغيرة المقدار جدًا . وقد أنشأ تيارًا داخل حلقة من الرصاص باستخدام الحث المغناطيسي - وهو موضوع سنتناوله في الفصل العشرين . فلو أن مقاومية الرصاص لم تكن في الحقيقة صفرًا ، لتوقعنا أن

يضمحل التيار ليصل فى النهاية إلى الصفر نظرًا لأن طاقة حركـة الإلكترونـات ستتحول بالتدريج إلى طاقة حرارية للرصاص . على أن أونيس كان غـير قـادر علـى اكتشـاف أى انخفاض فى تيار الحلقة طوال فترة امتدت عدة ساعات وقد أعيدت هـذه التجربـة عـدة مرات بواسطة باحثين مختلفين منذ ذلـك الوقـت ، وقـد لوحـظ أن التيـارات المـارة فـى الحلقات فائقة التوصيل ظلت موجودة على امتداد سنوات كثيرة دون انخفاض ملحوظ . ولـهذا نستنتج أن الانخفاض المفاجئ فى المقاومية والذى يحدث عند T_c إنما يصـل بـها إلى الصفر حقيقةً .

ولم يظهر تفسير نظرى متكامل للموصلية الفائقة ؛ مبنى على ديناميكـا الإلكترونـات إلا عام 1957 على أيدى ج . باردين ، ل . كوبر ، ج . شريفر الذين كانوا معًا فى جامعة ألينوى ، وقد تقاسموا جائزة نوبل عـام 1972 فـى الفيزيـاء لقـاء نظريتـهم التـى أصبحت تعرف باسم نظرية BCS (وهى الحروف الأولى من أسمائهم) . وكما هو الحال بالنسبة لمعظم الحلول الناجحة للمشكلات الفيزيائية فـى القـرن العشريـن ، فـإن نظريـة BCS تقوم على مبادئ نظرية الكم . وحيث أن الأساس الرياضى لنظرية الكم يقع خارج نطاق هذا الكتاب فإن طابع مناقشة هذه النظرية سيتخذ فى ما يلى صيغة وصفية .

عندما يتحرك إلكترون ما خلال موصل فإنه يتفاعل مع الذرات القريبة منه مغيرًا من مواضعها بدرجة طفيفة ، ومتسببًا فـى اهـتزازات موضعيـة فـى شبيكـة الوصـل (وهـى الـهيكل الفراغى الذى تترتب فيه الذرات بانتظام) . والقوة التى تؤثـر علـى الإلكـترون من جانب الذرة أثناء هذا التفاعل تشتت اتجاه حركة الإلكترون ؛ لاغيـة بذلـك إسـهام الإلكترون ـ مؤقتًا ـ فى التيـار المـار داخـل الموصـل . وعندمـا يكـون الفلـز فـى درجـات الحرارة « المعتادة » فإن الاهتزازات الموضعيـة تقتسـم بسـرعة وتتشـتت خـلال الفلـز ، مما ينشأ عنه ارتفاع فى الطاقة الحرارية للفلـز وهـو مـا أشرنـا إليـه مـن قبـل علـى إنـه **تسخين جول** .

وطبقًا لنظريـة BCS ، فعندمـا تكـون درجـة حـرارة الفلـز أدنـى مـن T_c فـإن طاقـة اهتزازات الشبيكة التى سببها إلكترون واحد ترتد سريعًا (فى غضـون 10^{-12} s عـادة) إلى إلكترون آخر بدلاً من اقتسامها وتشتتها خلال الموصل . ويعنى هـذا أن تظـل الطاقـة الكلية للإلكترونات الحاملـة للتيـار ثابتـة ، ولا يحـدث احتجـاز للطاقـة مـن جـانب ذرات الموصل ، ولا يكـون هنـاك بالتـالى تسخين جـول . كمـا يعنـى أن التيـار الـذى تحملـه الإلكترونات بشكل جماعى لن يضمحل ومن ثم تكون مقاومية الموصل صفرًا .

على أن عملية تبادل الطاقة فى منظومـة الإلكـترون ـ الشبيكـة ـ الإلكـترون لا يمكـن شرحها فى إطار النظرية الكلاسيكية . وتكون نتيجة تبـادل الطاقـة هـى خلـق تفـاعل **تجاذبى** بين الإلكترونين المشتركين فى العملية . وتبلغ المسافة بين الإلكترونين المتفاعلين ـ ويشار إليهما **كزوج مترابط** ـ نحو $1\ \mu m$ (وهى مسافة كبيرة جدًا إذا قورنت بمتوسـط التباعد بين الإلكترونـات فـى الفلـز) كمـا تكـون كميتـا تحـرك الإلكـترونين الخطيتـين متضادتين وكذلك تكون كميتا تحـرك الإلكـترونين الدورانيتـين الزاويتـين (المغزليتـين)

متضادتين . وحيث أن التفاعل بين أى إلكترونين حرين يكون تنافريًا من خلال قوة كولوم فإن الزوج المترابط تكون طاقته أقل من طاقة إلكترونين غير مترابطين . ومع اقتراب درجة حرارة الموصل من الصفر المطلق ، فإن الاهتزازات الحرارية للشبيكة تصبح من الضعف بحيث لا تقوى على كسر الارتباط بين الإلكترونات وتصبح كل إلكترونات التوصيل خلال الموصل بأكمله عبارة عن أزواج مترابطة وفى هذه الحالة ، لن يكون هناك تبادل للطاقة بين ذرات الشبيكة والإلكترونات ولهذا تصبح مقاومة الموصل صفرًا في الحقيقة .

هناك عدد كبير جدًا من التطبيقات العلمية لظاهرة التوصيل الفائق ، وسيكون فهمها أفضل بعد دراسة المغناطيسية . ولذلك سوف نرجئ مناقشة التطبيقات إلى القسم 12-20 حيث نناقش منظورًا حديثًا آخر يتناول الخواص المغناطيسية للموصلات الفائقة . وعلينا فى نفس الوقت أن نلاحظ أن درجات الحرارة الحرجة بالغة الانخفاض والمرتبطة بالتوصيل الفائق ، تتطلب الهليوم السائل كمبرد ، كما أن الوصول إليها والمحافظة عليها باهظ التكاليف . ومنذ أن اكتشف أونيس لأول مرة ظاهرة التوصيل الفائق ، فإن البحث قائم باستمرار سعيًا وراء مواد ذات درجات حرجة أكبر وأكبر حتى تصبح التطبيقات المهمة متاحة بشكل أكبر . وقد كان من الأهداف الواضحة إيجاد مواد ذات T_c فوق درجة غليان النيتروجين ، لأن النيتروجين السائل ، الذى يمكن الحصول عليه من الجو بتكلفة معقولة ، يمكن استخدامه عندئذ كمبرِّد . والنيتروجين السائل يغلى عند 77 K تقريبًا عند ضغط مقداره ضغط جوى واحد ، وهى درجة حرارة أكبر بكثير من أى درجة حرجة T_c عرفت قبل منتصف الثمانينيات من القرن العشرين .

وبدءًا من الاكتشاف الذى تم عام 1986 على أيدى ك. أ. موللر . ج. ج. بدنورز ، فإن أنواعًا جديدة من الأكاسيد الخزفية ذات الدرجات الحرجة فوق 77 K ، قد صارت هدفًا للبحوث المستفيضة . وتمتلك بعض هذه المواد موصلية فائقة عند درجات حرارة تصل إلى 120 K أو أكبر منها بقليل . ويشعر كثير من الباحثين أن قيمًا أعلى من هذه للدرجات الحرجة يمكن الوصول إليها وأن الكثير من تطبيقات التوصيل الفائق سيصبح عمليًا في المستقبل القريب . على أن آخرين يشعرون أن هناك كثيرًا من العوائق لا زال قائمًا ، مشيرين بذلك إلى أن الأكاسيد الخزفية هشة ولا يمكن سحبها لصناعة الأسلاك أو تشكيلها بسهولة لصنع أدوات مفيدة . وعلى أية حال فالبحث عن موصلات فائقة ذوات درجات مرتفعة سيبقى غالبًا دؤوبًا وبشدة خلال القرن القادم .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) دائرة التيار المستمر ، (ب) التيار ، (جـ) الأمبير ، (د) قانون أوم ، (هـ) المقاومة ، (و) الأوم ، (ز) معامل تغير المقاومية مع درجة الحرارة ، (ح) القدرة الكهربية ، (ط) قاعدتا كيرتشوف ، (ى) الدوائر المتصلة على التوالى وعلى التوازى ، (ك) المقاومة المكافئة ، (ل) فرق الجهد الطرفى والقوة الدافعة الكهربية ، (هـ) المقاومة الداخلية .

2 أن تستخدم العلاقة $I = \Delta q/\Delta t$ فى حالات بسيطة .

3 أن تفسر الرسم البيانى لدائرة بسيطة . وأن تذكر فرق الجهد بين النقط المختلفة فى الدائرة .

4 أن تذكر أىُّ طرفى مقاوم ما عند جهد أعلى عندما يكون اتجاه التيار خلال المقاوم معروفاً .

5 أن تستخدم قانون أوم فى حالات خاصة .

6 أن تحسب مقاومة قطعة معينة من السلك إذا كانت مقاومية مادة السلك معلومة .

7 أن تحسب مقاومة سلك عند درجة حرارة معينة عندما تكون المقاومة ومعامل تغيرها مع درجة الحرارة عند درجة حرارة مرجعية معروفة .

8 أن تستخدم معادلة القدرة $P = IV$ لتعيين القدرة المفقودة أو المكتسبة فى مقاوم أو بطارية أو مكثف تحت ظروف التيار المستمر .

9 أن تطبق قاعدة النقطة لكيرتشوف .

10 أن تكتب معادلة العروة لكيرتشوف بالنسبة لدائرة متصلة على التوالى وتحتوى على بطاريات ، ومقاومات ، ومكثفات .

11 أن تختزل مجموعة معينة من المقاومات المتصلة على التوالى وعلى التوازى فى مقاوم واحد مكافئ .

12 أن تستخدم قاعدتى كيرتشوف لحل دوائر التيار المستمر التى تحتوى على بطاريات ، ومقاومات وسعات .

13 أن ترسم مخطط دائرة منزلية نموذجية وأن تحدد العناصر المختلفة فيها وأن تحسب التيار المسحوب بواسطة الأقسام المختلفة للدائرة المنزلية عندما تكون الأجهزة التى يغذيها معروفة .

14 أن تحلل موقفاً كهربيًا معينًا من وجهة نظر الأمان .

15 أن تشرح سبب أن الجهد الطرفى لبطارية ما ليس دائمًا مساويًا لقوتها الدافعة الكهربية . وأن تحسب الجهد الطرفى إذا كانت كل من $\mathscr{E}$ و I و r معروفة .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

وحدة التيار الكهربى (A)

$$1 \text{ ampere (A)} = 1 \text{ C/s}$$

وحدة المقاومة (Ω)

$$1 \text{ ohm } (\Omega) = 1 \text{ V/A}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

التيار الكهربى (I)

يعرف التيار الكهربى (بوحدات الأمبير) بأنه معدل تدفق الشحنة الكهربية .

$$I = \Delta q / \Delta t$$

ويكون اتجاه التيار هو اتجاه سريان الشحنة الموجبة .

المقاومة (R) وقانون أوم

تعرف المقاومة (بوحدات الأوم) لعنصر من عناصر الدائرة على أنها النسبة بين فرق الجهد عبر العنصر والتيار المستمر المار فيه :

$$R = \frac{V}{I}$$

وتخضع المقاومات التى لها قيمة ثابتة R على مدى من قيم V و I لقانون أوم ويقال أنها مقاومات أومية .

خلاصة :

1 عند استخدام قاعدتي كيرتشوف لتحليل دائرة ما فعليك أولاً أن تميز كل تيار فى كل فرع مستقل من أفرع الدائـرة . ويمكـن اختيار أى اتجاه لكل تيار .

2 يمكنك تطبيق قاعدة النقطة على كل نقطة يمر فيها ولو تيار واحد جديد على الأقل . لابد أن يتفق تطبيق قاعدة النقطـة مـع اختيارك لاتجاه التيار .

3 يمكنك تطبيق العروة على كل عروة مختلفة تتضمن على الأقل عنصر واحدا جديدة من عناصر الدائرة .

4 بالنسبة لإشارات تغيرات الجهد فتؤخذ كما يلى :

أ ـ البطاريات أو القوة الدافعة الكهربية : $\Delta V = +\mathcal{E}$ عندما يكون التحرك من الطرف السالب إلى الطرف الموجب .

ب ـ المقاومات : $\Delta V = -IR$ عندما تتحرك عبر المقاوم فى الاتجاه الذى اخترته للتيار .

جـ ـ المكثفات $\Delta V = +q/C$ عندما تتحرك من اللوح سالب الشحنة إلى اللوح موجب الشحنة .

5 إذا اخترت اتجاهًا خاطئًا لأحد التيارات فإن الحل بالنسبة لذلك التيار سيتخذ إشارة سالبة .

6 يكون التيار المستمر فى فرع يحتوى على مكثف صفرًا بالضرورة .

المقاومات المتصلة معًا على التوالى وعلى التوازى

المقاومات المتصلة على التوالى

المقاومة الكلية المكافئة لعدد n من المقاومات المتصلة على التوالى هى :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots + R_n \qquad \text{(على التوالى)}$$

المقاومات المتصلة على التوازى

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots\ldots + \frac{1}{R_n} \qquad \text{(على التوازى)}$$

خلاصة :

1 هذه القواعد هى نفسها المتبعة مع المكثفات فيما عدا أن قاعدتى التوالى والتوازى معكوستان .

2 تحمل كل المقاومات المتصلة على التوالى فى نفس الفرع نفس التيار بينما يكون لكـل منـها فـرق جـهد مختلـف (إذا كـانت المقاومات مختلفة) .

3 يكون لكل المقاومات المتصلة على التوازى فى فرع من فروع الدائرة نفس فرق الجهد بينما تحمل تيارات منفردة مختلفة (إذا كانت مختلفة القيم) .

القوة الدافعة الكهربية (EMF) والجهد الطرفى لبطارية ما

تعمل البطارية المتصلة فى دائرة عمل مصدر للقوة الدافعة الكهربية المتصلة علـى التـوالى مـع مقاومـة داخليـة r . وعندمـا تصدر البطارية تيارًا I فإن فرق الجهد الداخلى Ir يطرح من $\mathcal{E}$ لنحصل على الجهد الطرفى الفعال V_T :

$$V_T = \mathcal{E} - Ir$$

أما إذا كانت البطارية تتلقى تيارًا I (عند شحنها) ، فإن الجهد الطرفى يصبح :

$$V_T = \mathcal{E} + Ir$$

خلاصة :

1 يضمحل الجهد الذى تستطيع البطارية تقديمه للدائرة كلما زاد التيار المقدم منها للدائرة .

2 يكون للبطارية الحديثة مقاومة داخلية ضئيلة للغاية ، وفى هذه الحالة تكون البطارية فى وضع يسمح لـها بتقديم تيارات كبيرة عند قوة دافعة كهربية أقرب ما تكون للقيمة المقررة لـها . وكلما زاد عمر البطارية زادت مقاومتها الداخلية .

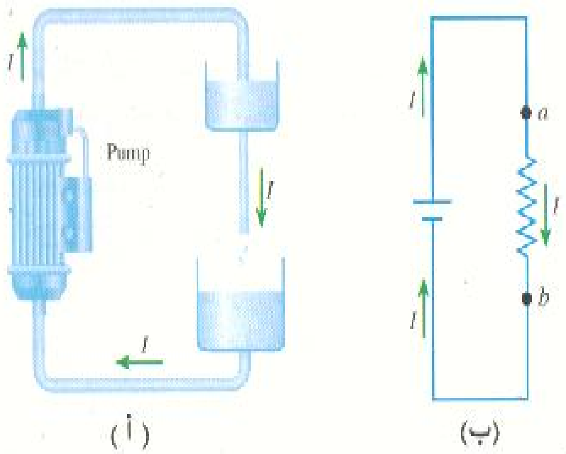
أسئلة وتخمينات

1 يصر بعض الطلاب أحيانًا على أن التيار يستهلك فى المقاوم . كيف يمكنك باستعمال الشبه مع المياه أن تقنع هؤلاء الطلاب بأن التيار لا يفقد فى المقاوم ؟

2 كيف لنا أن نعرف طرف البطارية ذا الجهد الأعلى ، أى الطرف الموجب فى رسم تخطيطى لدائرة ما ؟ وكيف نحدد أن طرف مقاوم ما هو الذى عنده الجهد الأعلى ؟

3 بصيلات الإثارة الفلورسنت هى فى العادة أكثر كفاءة فى إشعاع الضوء عن البصيلات المتوهجة (ذات الفتيل) ، بمعنى إنه عند استعمال نفس القدر من الطاقة الداخلة ، فإن البصيلة الفلورسنت تعطى ضوءًا أكبر من الذى تعطيه بصيلة متوهجة . حاول أن تلمس بحذر بصيلة فلورسنت وأخرى متوهجة بعد أن تكونا مضاءتين لعدة دقائق . اشرح الآن لماذا كانت البصيلة المتوهجة أقل كفاءة فى إشعاع الضوء .

4 يوضح الشكل م 1-18 (أ) كيف ترفع المضخة المياه إلى خزان علوى بمعدل يجعل مستوى المياه يبقى ثابتًا . ويتساقط الماء ببطء من أنبوبة ضيقة إلى داخل الخزان السفلى . حدد أوجه الشبه بين الدائرة المائية والدائرة الكهربية المبينة فى الجزء (ب) .



شكل م 1-18

5 وصل مقاوم بين النقطتين a و b . كيف يمكن لأى شخص أن يخبر عما إذا كان هناك هبوط فى الجهد أو ارتفاع فى الجهد من النقطة a إلى النقطة b ؟ أعد السؤال بالنسبة لبطارية بالنسبة لمكثف .

6 اشرح النص التالى : بالنسبة للمقاومات المتصلة على التوالى تكون المقاومة المكافئة أكبر دائمًا من أكبر مقاومة فى المجموعة ، وبالنسبة للمقاومات المتصلة على التوازى تكون المقاومة المكافئة أصغر من أصغر مقاومة فى المجموعة .

7 استخدم أوميتر (وهو جهاز يتكون ـ أساسًا ـ من بطارية على التوالى مع أميتر حساس جدًا) لقياس مقاومتك الذاتية من إحدى يديك إلى اليد الأخرى . إن تيارًا مقداره نحو 0.02 A يمر خلال القطاع الأوسط للجسد كافٍ لإحداث شلل للجهاز التنفسى . ما هو مقدار فرق الجهد المطبق بين يديك ويكون كافيًا لصعقك ؟

8 لو إنك قبضت على سلكى التوصيل المتصلين بلوحى مكثف مشحون فقد تشعر بصدمة كهربائية . ويكون التأثير أكبر بكثير لمكثف سعته $2\,\mu F$ عنه لمكثف سعته $0.02\,\mu F$ على الرغم من أن كليهما شحن إلى نفس قيمة فرق الجهد . لماذا ؟

9 تحط الطيور على أسلاك الجهد العالى فى جميع الأوقات ؛ فلماذا لا تصعق ، حتى وإن حطت على جزء من السلك لا يغطيه العازل ؟

10 لو أن تيارًا مقداره كسر صغير من الأمبير مر من يد شخص ما وخرج من الأخرى فقد يصعق ذلك الشخص . ولكن إذا كان مسار التيار من إحدى اليدين إلى كوع نفس اليد فإن الإنسان ينجو من الصعق حتى لو كان التيار من الكبر بحيث يحرق اللحم . اشرح .

11 يفزع الوالدان دائمًا عندما يلعب أطفالهم بالقرب من مخارج الكهرباء (المقابس) . ناقش العوامل المختلفة التي تحدد مدى سوء الصدمة التي قد يصاب الطفل بها . ماذا يحدث لو أن طفلًا قام بقطع أسلاك مصباح كهربائي مستعملًا زردية قطع (قصافة) غير معزولة عندما تكون الأسلاك متصلة بمصدر الكهرباء ؟ وهل يكون هناك أي خطر على حياة الطفل ؟

12 اشرح السبب في أن لمس سلك مكشوف في دائرة منزلية عندما تكون في الطابق الأرضي الرطب ، أخطر بكثير مما لو كان اللمس لنفس السلك قد تم عندما كنت في الطابق الثاني .

13 إن استعمال جهاز راديو يعمل بالكهرباء بالقرب من حوض الاستحمام عند تكون في حوض الاستحمام بالغ الخطورة . لماذا ؟ هل ينطبق نفس الاستدلال العقلي على جهاز راديو يعمل بالبطارية ؟

مسائل

القسمان 1–18 و 2–18

1 يمر تيار مقداره 0.5 A خلال بصيلة إضاءة . (أ) ما هو مقدار الشحنة التي تمر خلال البصيلة في أربع ساعات ؟ (ب) ما عدد الإلكترونات التي تتدفق خلال المصباح أثناء هذه الفترة الزمنية ؟

2 يبلغ تيار الحزمة الإلكترونية في أنبوبة تليفزيون $56\,\mu A$. ما عدد الإلكترونات التي تضرب الشاشة كل دقيقة ؟

3 ما طول الفترة الزمنية التي تستغرقها شحنة مقدارها 64 C في المرور من خلال مساحة مقطع مستعرض لسلك ما يحمل تيارًا يساوي 72 A ؟

4 يبعث جهاز شحن للبطاريات تيارًا مقداره 3.6 A خلال بطارية لمدة 8.0 h . ما مقدار الشحنة المنتقلة إلى البطارية من جهاز الشحن في هذه الفترة ؟

5 توفر بطارية سيارة ما تيارًا مقداره 2.2 A لمدة 12 h . ما مقدار الشحنة المارة من البطارية خلال هذه الفترة ؟

■ 6 تدور شحنة منفردة مقدارها $+1.8\,\mu C$ في مسار دائري نصف قطره 2.0 m بسرعة مقدارها 1.0×10^5 m/s . ما هو متوسط التيار في المدار ؟

7 يصطدم 3.2×10^{12} إلكترونا بشاشة أنبوبة أشعة مهبط كل ثانية . ما هو التيار المقابل لحزمة الإلكترونات في الأنبوبة ؟

القسمان 3–18 و 4–18

8 عند توصيل بطارية مصباح جيب قوتها 3.0 V ببصيلة فإن التيار المار يكون 40 mA . ما هي مقاومة البصيلة ؟

9 تبلغ مقاومة فتيل بصيلة إضاءة 300 Ω . ما هو التيار الذي يمر بها عند توصيلها إلى مصدر للجهد مقداره 120 V ؟

10 افترض أن مقاومة جسمك من طرف لآخر هي 30 kΩ . ما هو التيار الذي يمر خلال جسدك إذا قبضت على طرفي بطارية قوتها 9.0 V ؟

11 يسحب جهاز التليفزيون الملون تيارًا مقداره 2.4 A عند تشغيله بجهد مقداره 120 V . ما هي المقاومة الفعالة للجهاز ؟

12 ما هو فرق الجهد عبر مقاوم 240 Ω إذا كان التيار المار به 0.25 A ؟

■ 13 يحمل مقاوم ما تيارًا مقداره 0.40 A عند توصيله بمصدر جهده 120 V . كم ستبلغ شدة التيار عندما (أ) خفض الجهد إلى 96 V ، (ب) أزيد الجهد إلى 144 V ؟

■ 14 مصباح للجيب يعمل بثلاث بطاريات قوة كل منها 1.5 V متصلة معًا على التوالي . ما هي مقاومة بصيلة الإضاءة إذا كانت تسحب تيارًا مقداره 0.60 A ؟

15 شحنة مقدارها 6.0×10^4 تسري لمدة ساعة خلال مقاوم عندما يكون فرق الجهد عبره 9 V . أوجد مقاومة المقاوم .

16 أوجد مقاومة سلك من الألومنيوم طوله 24 m وقطره 1.6 mm عند درجة حرارة 20°C .

17 أوجد مقاومة سلك من الفضة طوله 40 cm وقطره 0.160 m عند درجة حرارة 20°C .

■ 18 قيست مقاومة بكرة من السلك النحاسي المعزول وذلك بتوصيل السلك كله ببطارية قوتها 9 V وتسبب مرور تيار شدته 0.3 A في السلك بأكمله . فإذا كان قطر الجزء المعدني من السلك هو 0.80 mm . فكم يكون طول السلك بالبكرة ؟

■ 19 يبلغ قطر السلك النحاسي الذي رقمه 18 ما قيمته 1.024 mm . وحد الأمان الأقصى لشدة التيار المار في مثل هذا القطر من السلك هو 12 A . (إذا زاد التيار عن هذا فإن السلك يصبح ساخنًا جدًا) . (أ) أوجد مقاومة قطعة طولها 20 m من هذا السلك عند درجة حرارة 20°C . (ب) كم يبلغ فرق الجهد بين طرفي قطعة السلك المذكورة في (أ) إذا كانت تحمل تيارًا قدره 12 A ؟

20 يُراد استخدام سلك مقاومته 0.25 Ω لكل متر من طوله في مد شبكة أسلاك كهربائية بمنزل . ما هو أقصى طول من السلك يمكن استخدامه إذا كانت المقاومة الكلية للسلك لا يجب أن تزيد على 750 Ω ؟

21 أريد استخدام ملف من سلك التنجستين مقاومته 30 Ω عند 20°C في قياس درجة الحرارة . ما مقدار التغير في مقاومته عندما تتغير درجة الحرارة بمقدار 4°C بالقرب من 20°C ؟

22 يصنع عنصر التسخين في مدفأة غرفة من سلك النيكل ـ كروم الذي يبلغ قطره 1.0 mm . اعتبر أن مقاومية النيكل ـ كروم تساوي 10^{-6} Ω.m . فإذا كانت مقاومة المدفأة 25 Ω فكم يكون طول السلك في عنصر التسخين ؟

23 تبلغ مقاومة ملف من السلك 156.8 Ω عند 20°C ، و 166.6 Ω عند 50°C . ما هو عامل تغير المقاومة مع درجة الحرارة لمادة هذا السلك ؟

24 ما هي النسبة المئوية لتغير مقاومة سلك من التنجستين عندما تتغير درجة حرارته من 15 إلى 36°C ؟

25 عند أية درجة حرارة تكون مقاومية الألومنيوم هي نفس مقاومية التنجستين عند 20°C ؟

■ 26 يحمل سلك من الحديد طوله 3 m تيارًا مقداره 0.2 A عندما يوصل ببطارية قوتها 6 V . ما هو طول سلك من الفضة يحمل نفس التيار عندما يتصل ببطارية قوتها 6 V أيضًا ؟

القسم 18-5

27 بصيلة إضاءة مطبوع عليها 100W/120V . (أ) ما مقدار التيار الذي تسحبه ؟ (ب) ما هي مقاومتها عندما تعمل بجهد مقداره 120 V ؟

28 صمم مصباح فلورسنت قدرته 15 W ليعمل بفرق جهد مقداره 120 V . (أ) ما مقدار التيار الذي يسحبه ؟ (ب) ما هي مقاومته ؟

■ 29 يصنع عنصر التسخين في مدفأة غرفة من سلك التنجستين طوله 4 m . وعندما توصل المدفأة بجهد مقداره 120 V فإن درجة حرارة الفتيل تصل إلى 450°C وتستهلك 1500 W من القدرة . ما هي مساحة المقطع المستعرض للسلك ؟

30 كم من الوقت يستغرق سخان مغمور قدرته 500 W لكي يرفع درجة حرارة 300 g من الماء من 23°C إلى 88°C ؟ اعتبر عدم وجود أي فقد للحرارة إلى الأجسام المجاورة .

31 يعمل جهاز تشغيل الأسطوانات المدمجة ببطارية قوتها 9 V وعندئذ يسحب تيارًا مقداره 280 mA . ما مقدار الطاقة التي يبددها ؟

32 محرك قدرته 0.5 hp (حصان) متصل بخط للجهد شدته 120 V . ما مقدار التيار الذي يسحبه المحرك ؟

33 (أ) ما مقدار الطاقة (معظمها حراري) التي تشعها بصيلة مضاءة قدرتها 75 W في فترة 5 min. ؟ (ب) كم كيلو وات ساعة تستهلك في هذه الفترة ؟

34 حـدث ارتفاع مفاجئ في جهد خط كهربي فأصبح الجهد لحظيًا 132 V . ما هي النسبة المئوية لزيادة الناتج من بصيلة مصباح إضاءة أرقامه 60 W/120V بفرض أن مقاومتها لا تتغير ؟

35 يعمل أحد مصابيح الإنارة في الشارع قدرته 200 W لمدة 12 h يوميًا . ما عدد الكيلو وات ـ ساعة من الطاقة يتم استهلاكها في 30 يومًا ؟ ما مقدار التكلفة إذا كان سعر الكيلو وات من الكهرباء هو $ 0.068 ؟

الأقسام من 18-6 إلى 18-10

36 أوجد المقاومة المكافئة للمقاومات 2 Ω ، 4 Ω ، 6 Ω ، 10 Ω عندما تتصل (أ) على التوالي و (ب) على التوازي .

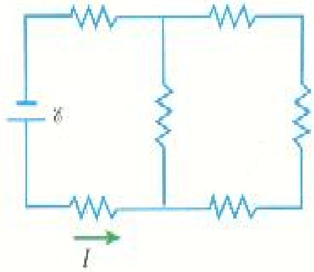
37 وصِّلت ثلاث مقاومات هي 2 Ω ، 3 Ω ، 6 Ω على التوازي ، ثم وصِّلت المجموعة على التوالي مع مقـاوم 4 Ω . مـا هـي المقاومة المكافئة للمجموعة ؟

38 وصِّلت ثلاثة مقاومات 6 Ω و 2 Ω ، 10 Ω على التوالي مع بطارية 9 V . (أ) أوجد المقاومة المكافئة للمجموعة . (ب) ما مقدار التيار المار في كل مقاوم ؟

39 وصلت المقاومات في المسألة السابقة على التوازي عبر بطارية 9 V . أوجد (أ) المقاومة المكافئـة للمجموعـة . (ب) التيـار المار في كل مقاوم .

■ 40 وصل المقاومان 4 Ω و 6 Ω على التوازي عبر بطارية . وكان التيار المار خلال المقاومة المكافئة 2.5 A . أوجد فولطية البطارية .

41 كل مقاوم في الشكل م 2–18 مقداره 6 Ω وكانت $\mathscr{E} = 3.0$ V . أوجد (أ) المقاومة المكافئة للمجموعة و (ب) التيار المسحوب من البطارية .



■ 42 في الشكل م 2–18 كانت كل من المقاومات الرأسية 4 Ω ، بينما كـانت كـل مـن المقاومـات الأفقيـة 6 Ω . أوجـد (أ) المقاومـة المكافئـة للمجموعـة و (ب) التيـار المسحوب من البطارية إذا كانت $\mathscr{E} = 3.0$ V .

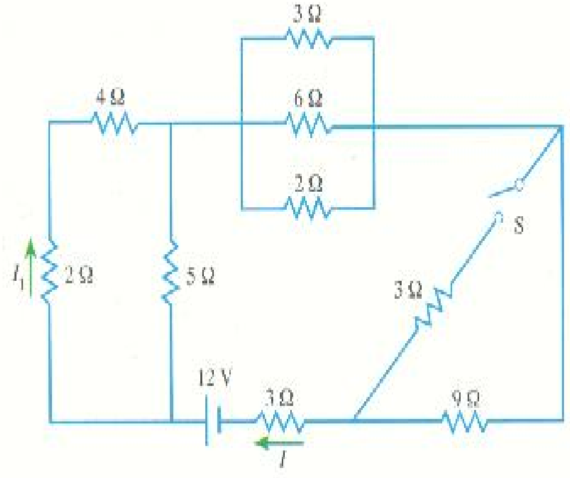
■ 43 في المسألة رقم 42 أوجد التيار المار خلال المقاومين الرأسيين .

شكل م 2–18

■ 44 وصل مقاومان أحدهما 8 Ω والآخر 10 Ω على التوالي مع مصدر للجهد . وكان فرق الجهد عبر المقاوم 10 Ω هـو 25 V . ما مقدار الجهد الصادر من مصدر الجهد ؟

■ 45 وصل المقاومان المذكوران في المسألة 44 على التوازي عبر مصدر للجهد . وكان التيار المار خلال المقاوم 8 Ω هـو 1.2 A . أوجد الجهد الصادر من مصدر الجهد ؟

■ 46 أوجد المقاومة المكافئة كما ترى من جهة البطاريـة فـي شكل م 3–18 . (أ) عندمـا يكـون المفتاح S مفتوحًا و (ب) عندما يكون مغلقًا . (جـ) مـا هـو التيـار المار خلال المقاوم 4 Ω عندما يكون المفتاح مغلقا ؟

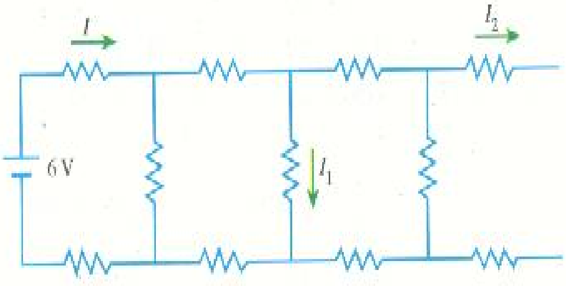


شكل م 3–18

47 في المسألة رقم 46 أوجد التيار المار خلال المقاوم 9 Ω (أ) عندما يكون المفتاح S مفتوحًا و (ب) عندما يكون مغلقًا .

48 في الشكل م 3–18 أوجد فرق الجهد عبر المقاوم 3 Ω المجاور للبطارية من ناحية اليمين (أ) عندما يكون المفتاح S مفتوحًا و (ب) عندما يكون مغلقًا .

49 (أ) أوجد المقاومة المكافئة للدائرة المبينة في الشكل م 4–18 لو كانت قيمة كل مقاوم 5 Ω في الدائرة الموضحة بأكملها . (ب) أوجد I . (جـ) أوجد I_1 .
(د) ما مقدار I_2 ؟

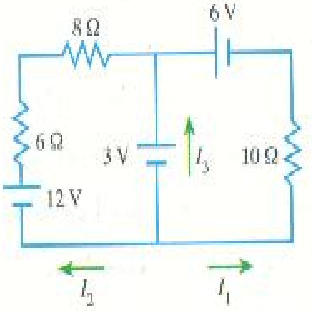


شكل م 4–18

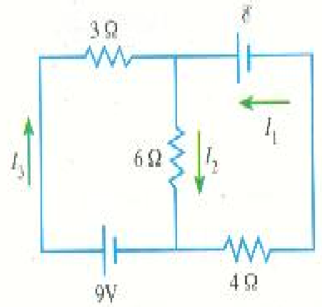
50 أعد المسألة السابقة عندما يكون كل من المقاومات الأفقية يساوي 4 Ω وكل من المقاومات الرأسية 6 Ω .

51 أوجد التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 في الشكل م 5–18 .

52 افترض أن قطبية البطارية في الشكل م 5–18 قد عكست ، فكم تكون قيم التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 ؟



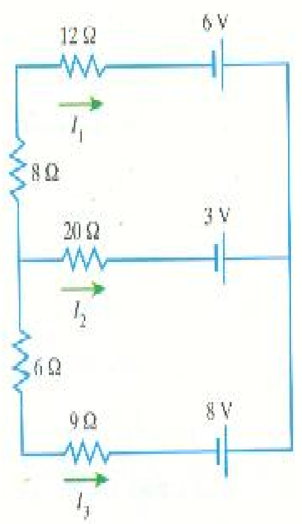
شكل م 5–18



53 في الشكل م 5–18 وجد أن التيار I_3 هو 3 A عند قياسه . أوجد (أ) التيارين I_1 ، I_2 ، (ب) القوة الدافعة الكهربية ℰ للبطارية و (جـ) فرق الجهد عبر المقاوم 4 Ω .

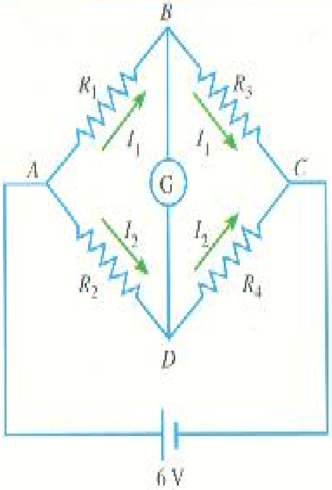
54 في الشكل م 6–18 ، إذا كانت ℰ تساوي 8 V أوجد (أ) التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 و (ب) فرق الجهد عبر المقاوم 3 Ω .

شكل م 6–18



55 في الشكل م 7–18 أوجد (أ) التيارات المارة في كل جزء من الدائرة و (ب) فرق الجهد عبر كل مقاوم .

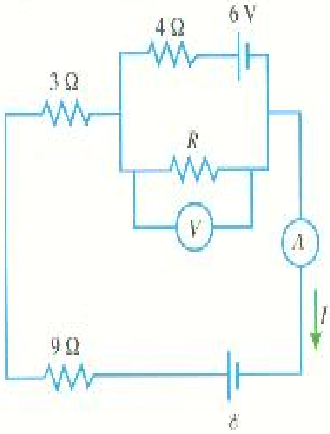
شكل م 7–18



شكل م 8–18

■ 56 تستخدم قنطرة هويتستون المرسومة فى الشكل م 8–18 أحيانا لقياس المقاومة . وعندما تتوازن الدائرة لا يمر تيار خلال جهاز القياس ، ويكون فرق الجهد بين النقطتين B و D صفرًا . إثبت أنه عندما تكون الدائرة متزنة (لا يمر تيار خلال G) فإن قيم المقاومات تحقق العلاقة : $R_1/R_2 = R_3/R_4$.

■ 57 فى الشكل م 8–18 ما هى قيمة المقاومة R_4 إذا كانت القنطرة تتزن عندما $R_1 = 60\ \Omega$ ، $R_2 = 20\ \Omega$ و $R_3 = 19.6\ \Omega$ ؟ (انظر المسألة 56) .

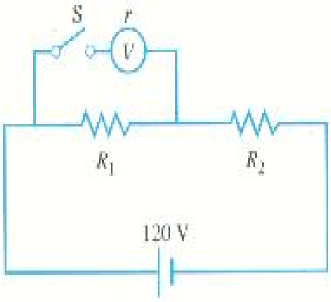


■ 58 يقرأ الفولتيميتر فى الشكل م 9–18 ، 3.6 V أما الأميتر فيقرأ 2.2 A عندما يكون اتجاه التيار كما هو موضح بالشكل . أوجد (أ) R و (ب) ℰ .

■ 59 فى الشكل م 9–18 ، ما مقدار ℰ لو كان التيار المار خلال البطارية 6 V صفرًا عندما كانت $R = 14\ \Omega$ ؟

■ 60 فى الشكل م 9–18 ، إذا كانت ℰ = 28 V و $R = 8\ \Omega$ فما هى قراءة (أ) الأميتر ، (ب) الفولتميتر ؟

شكل م 9–18



■ 61 يستخدم فولتيميتر مقاومته الداخلية $4.0 \times 10^4\ \Omega$ لقياس فرق الجهد عبر المقاوم $R_1 = 12\ k\Omega$ كما فى الشكل م 10–18 . اعتبر $R_2 = 24\ k\Omega$. (أ) ما مقدار فرق الجهد عبر R_1 عندما يكون المفتاح S مفتوحًا ؟ (ب) ما هى المقاومة المكافئة للدائرة عندما يكون المفتاح S مغلقًا ؟ (جـ) ما هو فرق الجهد عبر R_1 عندما يكون المفتاح S مغلقًا ؟

شكل م 10–18

القسم 11–18

62 وصل مصباح مقاومته 192 Ω ومحمصة خبز مقاومتها 16 Ω ومروحة مقاومتها 60 Ω على التوازى فى دائرة منزلية تغذيتها 120 V أوجد (أ) مجموع التيارات المسحوبة فى الدائرة ، (ب) فرق الجهد عبر محمصة الخبز ، (جـ) التيار المار فى المروحة ، (د) الطاقة المبددة بواسطة محمصة الخبز .

63 دائرة خاصة يغذيها 120 V وبها محمصة خبز 1200 W ومصباح 60 W ، ومكواة لحام 600 W وكلها تعمل معًا فى نفس الوقت . ويحترق المصهر (الفيوز) عند إشعال بصيلة إضافية قدرتها 40 W . ما أقصى تقدير لتحمل المصهر ؟

64 منزل به مجفف قدرته 1500 W وغسالة قدرتها 540 W وخمسة مصابيح إضاءة قدرة كل منها 40 W ، وجهاز تليفزيون قدرته 25 W وكلها تستمد طاقتها من نفس الخط الذى يوفر 120 V . ما هو أدنى تيار يجب أن يوصل المصهر (الفيوز) على أساسه ؟

65 ما عدد البصيلات ذات القدرة 75 W التى يمكن استخدامها فى منزل دون أن يحترق المصهر الذى تياره المقرر 15 A ؟

■ 66 جهاز كهربائى مصمم لأن يستهلك 2000 W من القدرة عندما يعمل عند جهد مقداره 240 V . (أ) إذا اعتبرت أن مقاومة الجهاز تظل ثابتة فما هو مقدار ما تسحبه من تيار إذا وصلت بمصدر جهده 120 V ؟ (ب) وما مقدار القدرة التى تستهلكها فى هذه الحالة ؟

■ 67 دائرة منزلية تعمل بجهد مقداره 120 V وتحتوى على قاطع دائرة يتحمل حتى 30 A . ثم أديرت مكواة قدرتها 1500 W وشواية كهربائية قدرتها 2000 W ومصباح فى نفس الوقت . فما هى أقصى قدرة للبصيلة يمكن استعمالها دون أن يعمل قاطع الدائرة ؟

القسم 12-18

68 عندما يسحب تيار مقداره 3.2 A من بطارية معينة فإن جهدها الطرفي يهبط من قيمته المناظرة لتيار قيمته صفر وهى 1.57 V إلى 1.28 V . ما هى المقاومة الداخلية للبطارية ؟

69 ما هو أقصى تيار يمكن سحبه من بطارية قوتها 1.57 V ومقاومتها الداخلية 0.1Ω ؟

■ 70 مقاوم 7 Ω يسحب تيارًا مقداره 0.2 A عندما يوصل ببطارية . وعند توصيل نفس البطارية بمقاوم 4.5 Ω فإن التيار يصبح 0.3 A فى الدائرة . أوجد (أ) القوة الدافعة الكهربية (emf) و (ب) المقاومة الداخلية للبطارية .

■ 71 مصباح جيب يعمل بثلاث بطاريات من الحجم AA متصلة على التوالى وقوة كل منها 1.5 V وعند إضاءة المصباح فإنه يسحب تيارًا مقداره 0.5 A ويهبط الجهد الطرفى للبطاريات إلى 3.3 V . ما هى المقاومة الداخلية لكل بطارية ؟

■ 72 الجهد الطرفى لبطارية معينة هو 11.52 V عندما تكون متصلة بمقاوم 24 Ω ويكون 11.76 عند توصيلها عبر مقاوم 50 Ω . أوجد (emf) للبطارية وكذا مقاومتها الداخلية .

73 يسحب مقاوم 58 Ω تيارًا مقداره 150 mA عندما يتصل عبر بطارية 9 V . (أ) ما هى المقاومة الداخلية للبطارية ، (ب) كم يصير الجهد الطرفى للبطارية عند توصيلها بالمقاوم ؟

مسائل إضافية

■ 74 يرتفع التيار المار خلال مقاوم ما بمقدار 2 A عندما يرتفع فرق الجهد عبر ذلك المقاوم من 8 V إلى 12 V . ما هى مقاومة المقاوم ؟

■ 75 لديك ثلاثة مقاومات هى 3 Ω ، 5 Ω و 8 Ω . (أ) ما عدد القيم المختلفة للمقاومة يمكنك الحصول عليها باستخدام هذه المقاومات ؟ (ب) ما هى هذه القيم وكيف تتصل المقاومات معًا فى كل حالة ؟

■■ 76 كانت المقاومة المقاسة لسلك معدنى ما طوله وقطرة الابتدائيين هما L_0 ، d_0 على الترتيب ، هى 4 Ω . ثم شد السلك تحت تأثير إجهاد شد إلى أن أصبح قطره منتظمًا ومقداره $0.4\ d_0$. أوجد القيمة الجديدة لمقاومة السلك .

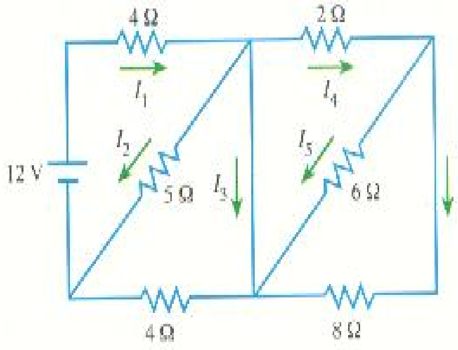
تلميح : لاحظ أن الحجم الكلى وكتلة المعدن للسلك لا يتغيران تحت تأثير إجهاد الشد .

■■ 77 يراد صنع مقاوم لا يعتمد على درجة الحرارة وتكون مقاومته 40 Ω وسيكون على هيئة مقاوم جرافيتى متصل على التوالى مع مقاوم من التنجستين . ما هى قيم المقاومة التى يجب أن يكون عليها كل مقاوم عند 20°C ؟

■■ 78 سلك معدنى دقيق نصف قطره $r = 3.8 \times 10^{-2}$ mm وصل طرفاه ببطارية فسحب تيارًا مقداره 3.6 A ، وكان المجال الكهربى القائم بطول السلك هو 84 V/m . أوجد مقاومية مادة السلك .

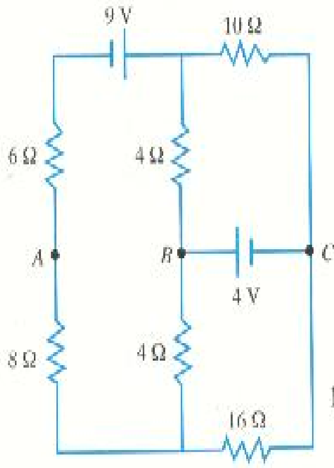
79 وصِّل مقاوم من الجرافيت على التوالي مع مقاوم من الحديد $9\ \Omega$ (عند $20^\circ C$) كم يجب أن تكون مقاومة المقاوم الجرافيتي حتى تكون المجموعة ذات مقاومة لا تعتمد على درجة الحرارة ؟ وما هي مقاومة المجموعة ؟

80 عين قيم التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 ، I_4 ، I_5 و I_6 في الشكل م 11–18 .



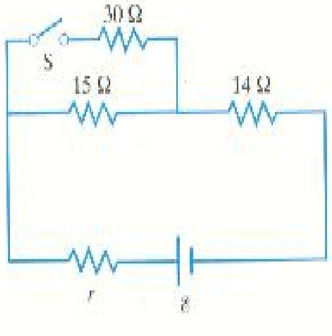
شكل م 11–18

81 في الشكل م 12–18 احسب (أ) فرق الجهد بين النقطتين A و B ، (ب) فرق الجهد بين النقطتين A و C ، (جـ) القدرة الواصلة إلى المقاوم $16\ \Omega$.



شكل م 12–18

82 في الشكل م 13–18 كان الجهد الطرفي لبطارية ما عند قياسه $5.8\ V$ عندما كان المفتاح S مفتوحًا وكان $5.76\ V$ عندما كان مغلقًا . أوجد القوة الدافعة الكهربية $\mathscr{E}$ والمقاومة الداخلية r للبطارية .



شكل م 13–18

الفصل التاسع عشر



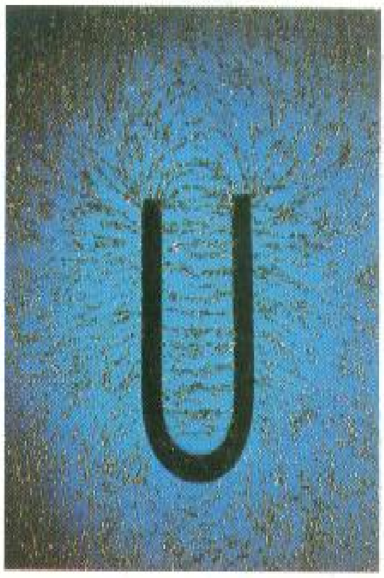
المغناطيسية

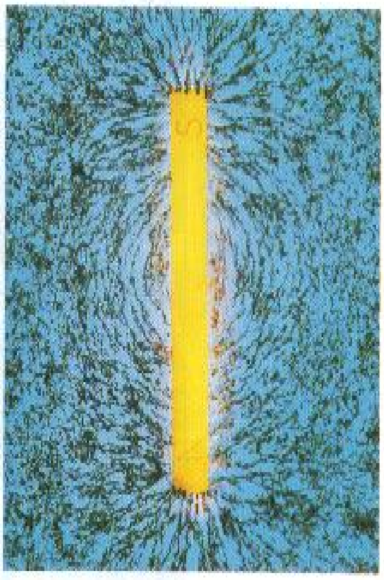
أجرينا ونحن أطفال فـي المدرسة الابتدائية تجارب بسيطة تتناول المغناطيسية ، وقد عرفنا أن القضيب المغناطيسي له قطبان ، قطب شمالي وقطب جنوبي . ثم أدركنا بعد ذلك أن الأقطاب المختلفة تتجاذب مع بعضها البعض ، وأن الأقطاب المتشابهة تتنافر . وعرفنا أيضًا أن الكرة الأرضية تعمل كمغناطيس هائل وأن إبرة البوصلة المغناطيسية تصطف بامتداد المجال المغناطيسي للأرض .

وعندما نثرنا بعض برادة الحديد على لوح زجاجي موضوع فوق مغناطيس اكتشفنا أن البرادة كونت صورة للمجال المغناطيسي المحيط بالمغناطيس . وقد عرفت معظم هذه الحقائق منذ آلاف السنين . على أن الأمر تطلب الانتظار حتى عام 1820 عندما اكتشف العلماء أن المغناطيسية وثيقة الصلة بالتيارات والمجالات الكهربية . بل إنه حتى يومنا هذا ، فإن العلماء لا يزالون يقومون باكتشافات فيما يتعلق بالمغناطيسية والمواد التي تصنع منها المغناطيسيات . وسوف نرى في الفصول القادمة أن المغناطيسات وتأثيراتها ليست سوى جانب صغير من جوانب المغناطيسية .

19-1 تخطيط المجال المغناطيسي

لقد صكت معظم مصطلحات المغناطيسية منذ عدة قرون على أيدى أولئك الذين بادروا ببحث سلوك المغناطيسات . وكانت المغناطيسات الأولى مجرد قطع من الصخور الحاملة للحديد وأطلق عليها عندئذ حجر المغناطيس . ونعرف الآن أن الحديد واحد من مواد قليلة لها خاصية القدرة على التمغنط بشكل دائم . وهذه المواد التي تشمل النيكل والكوبالت تسمى مواد فيرومغناطيسية (كلمة « فيروم » اللاتينية معناها « حديد ») .





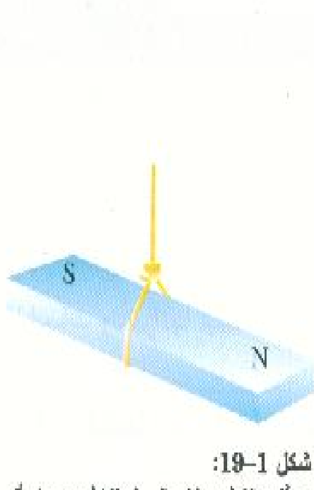
تتوجه قطع برادة الحديد بواسطة المجالات المغناطيسية لمغناطيس على هيئة قضيب أو حدوة حصان مشكّلة بهذا أنماط المجالات .



يكون لقطع من خام الماجنتيت ، المسمى بحجر المغناطيس ، مجال مغناطيس دائم يجذب إليه إبرة البوصلة .

وقد عرف من قديم الزمن أن قطعًا مستطيلة من حجر المغناطيس يمكن أن تعلق بواسطة خيط ، ويستخدم كبوصلة بدائية يستعان بها فى تحديد اتجاه يناظر الشمال الجغرافى ، وكما يحدث بالنسبة لإبرة البوصلة المغناطيسية فى عصرنا الحالى ، فإن حجر المغناطيس يتوجه بحيث يصطف طوله مع المجال المغناطيسي للأرض وقد أطلق على طرفى المغناطيس المصنوع من حجر المغناطيس **الأقطاب** المغناطيسية ، فصار القطب الذى يشير تقريبًا نحو القطب الشمالى الجغرافى هو القطب الشمالى المغناطيسى ، أما الطرف المقابل له فسمى القطب الجنوبى للمغناطيس . وقد احتفظنا إلى يومنا هذا بهذه التسميات عند الإشارة إلى خواص القضبان المغناطيسية وإبرة البوصلة (انظر الشكل 1–19) .

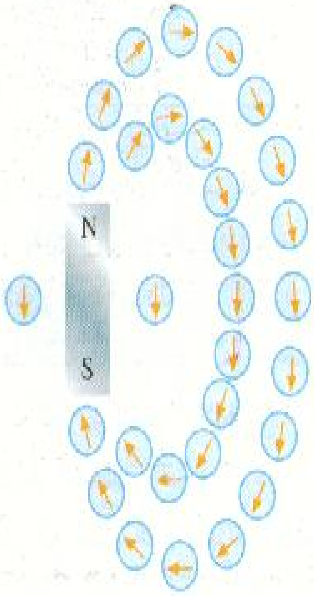
وقد أوضحت الدراسات التالية للمغناطيسية أن القطبين المتشابهين (القطبين الشماليين أو القطبين الجنوبيين) يتنافران مع بعضهما البعض بينما يتجاذب القطبان المختلفان . ويذكرنا هذا المسلك بما يحدث فى حالة نوعى الشحنة الكهربية ، وقد دفع هذا العلماء إلى محاولة العثور على « شحنات » مغناطيسية أو أقطاب أحادية . على إننا إذا حاولنا أن نفصل قطبى مغناطيس وذلك بكسر المغناطيس إلى نصفين ، فإن جهودنا ستبوء بالفشل ، لأن المغناطيس المكسور سيصبح مغناطيسين جديدين ولكل منهما قطب شمالى وآخر جنوبى .



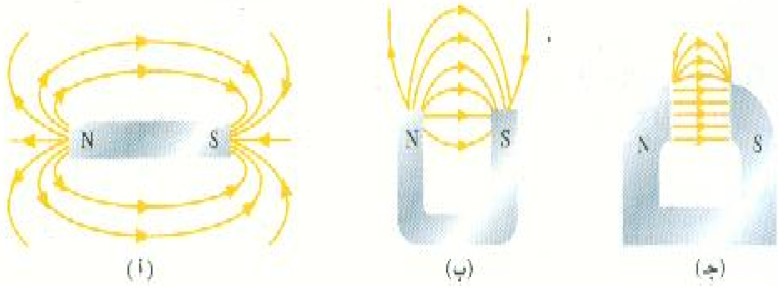
شكل 1–19:
يعرّف القطب الشمالى لمغناطيس ما بأنه القطب الذى يشير نحو الشمال على الكرة الأرضية عندما يعلق المغناطيس تعليقًا حرًا .

وتحدث أشياء مثيرة للاهتمام بالقرب من المغناطيسات ، فقطع الحديد غير الممغنطة كالمسامير أو برادة الحديد تنجذب إلى كلا القطبين . أما إبرة البوصلة فهى تنحرف إذا اقترب منها قضيب مغناطيسى . والسلك الذى يمر خلاله تيار كهربى يتجاذب أو يتنافر مع المغناطيسات ، وتيارات الجسيمات المشحونة يمكن حرفها بواسطة المغناطيسات ، ومن المناسب تفسير كل هذه الظواهر بدلالة ما نطلق عليه **المجال المغناطيسى** للمغناطيس .

وكما هي العادة دائمًا ، سنبدأ بتعريف المجال ، وإن كان ذلك اختياريًا ، بدلالة خاصية قابلة للقياس . وفي هذه الحالة فإننا نعرف **اتجاه** المجال المغناطيسي عند أية نقطة بأنه الاتجاه الذي تأخذه إبرة البوصلة إذا وضعت في تلك النقطة . افترض ، مثلاً ، إننا نود تخطيط اتجاه المجال المغناطيسي بجوار قضيب مغناطيسي كالمبين في الشكل 19-2 . ويمكننا عمل ذلك إذا وضعنا عددًا كبيرًا من إبر البوصلة الدقيقة الحجم عند نقط متعددة حول المغناطيس وملاحظة اتجاهها . وسوف نعتبر تأثير الإبر على بعضها البعض مهملاً إذا قورن بتأثير القضيب المغناطيسي على كل منها .



شكل 2-19:
يمكن تحديد اتجاه المجال المغناطيسي بالقرب من مغناطيس باستخدام عدد كبير من إبر البوصلة دقيقة الحجم .



شكل 3-19:
يشير المجال المغناطيسي ـ حسب التعريف ـ مبتعدًا عن القطب الشمالي ومتجهًا نحو القطب الجنوبي .

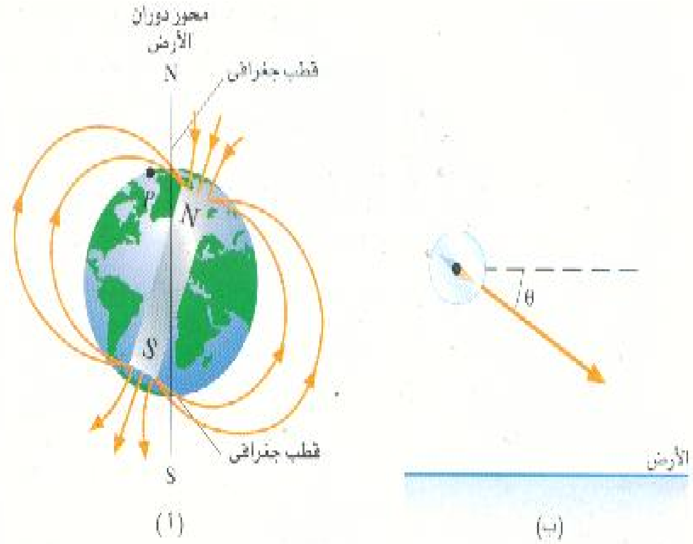
وإذا كان الطرف المحدد برأس السهم في إبرة بوصلة هو القطب الشمالي فإنه لابد أن يتنافر مع القطب الشمالي للمغناطيس ، ومن ثم فإبرة البوصلة الموضوعة بالقرب من القطب الشمالي لمغناطيس تشير بعيدًا عنه . وبالمثل فإن الإبرة الموضوعة بالقرب من القطب الجنوبي تشير نحوه لأن الأقطاب المختلفة تتجاذب . ولكي نخطط المجال المغناطيسي فإننا نرسم سلسلة من الخطوط حول المغناطيس بحيث تكون الأسهم المرسومة على تلك الخطوط في الاتجاه الذي تشير إليه إبرة البوصلة . وهذه الخطوط التي يطلق عليها **خطوط المجال المغناطيسي** ، ترى موضحة بالشكل 3-19 لثلاثة مغناطيسات ذات أشكال مختلفة . ومثلما دلت إبر البوصلات التي عرفتها فإن :

تتجه خطوط المجال المغناطيسي كما لو كانت خارجة من القطب الشمالي للمغناطيس وداخلة إلى القطب الجنوبي .

وتوضح المخططات كالتي ترى في الشكل 3-19 ليس اتجاه المجال فحسب وإنما شدته أيضًا . وكما كان الحال مع المجال الكهربي فإن خطوط المجال المغناطيسي تكون أكثر تكدسًا حيث يكون المجال أشد ما يمكن .

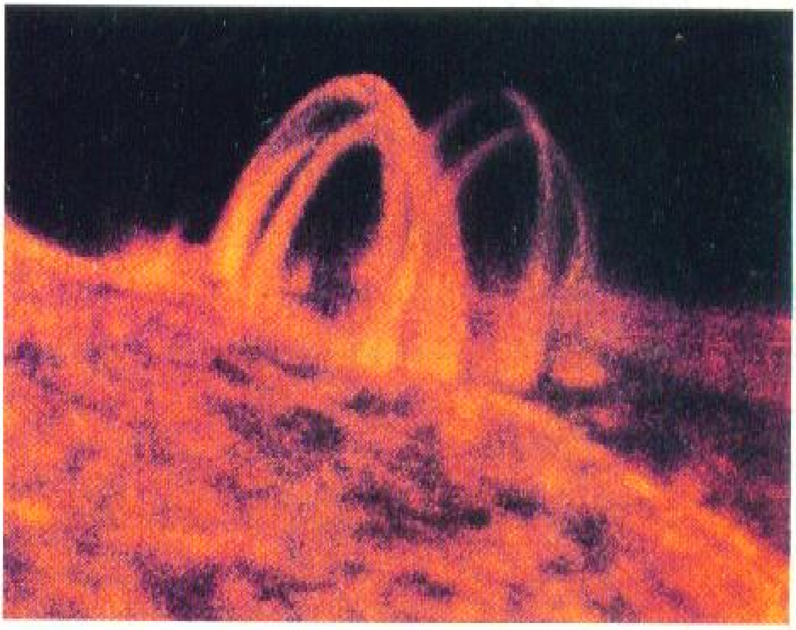
2-19 المجال المغناطيسي للأرض

يبين الشكل 4-19 مخططًا للمجال المغناطيسي للأرض . ويلاحظ أن نمط المجال شديد الشبه بذلك الخاص بقضيب مغناطيس . ويلاحظ أن الأقطاب المغناطيسية لا تنطبق على الأقطاب الجغرافية التي تتحدد بواسطة محور دوران الأرض .



شكل 4-19:
(أ) المجال المغناطيسي للأرض .
(ب) زاوية الميل هي الزاوية المحصورة بين المجال المغناطيسي B والخط الأفقي .

وسنقف الآن لحظة لنزيل مصدرًا هامًا للتشوش . لقد اعتدنا على القول بأن القطب الشمالي لإبرة البوصلة يشير نحو (أو ينجذب إلى) القطب الشمالي المغناطيسي للأرض وهذا طبعًا يتعارض مع ما هو ملاحظ من أن الأقطاب المتشابهة تتنافر . وينشأ اللبس لأننا نشير إلى القطب المغناطيسي القريب من القطب الشمالي الجغرافي على أنه القطب الشمالي المغناطيسي لمجال الأرض . فإذا ظللنا متمسكين بتعريفنا للقطب الشمالي للبوصلة على أنه القطب الذى يشير نحو الشمال لوجب أن نسمى هذا القطب بالقطب الجنوبي المغناطيسي للأرض . على أن تغيير المسميات التاريخية سيؤدى بلا شك إلى مزيد من اللبس أكثر مما يسببه الاعتراف بخطأ التسمية والتعايش معه .



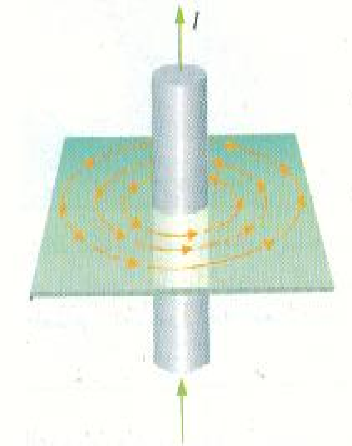
تقتنص المجالات المغناطيسية الجسيمات المشحونة كتلك التي توجد في الغازات الساخنة المنبعثة في جو الشمس . وحيث أن الغازات الساخنة تبعث ضوءًا فإنها بذلك تشي بتركيب المجال المغناطيسي للشمس كما تبينه عرى الشواظ الشمسي في الصورة . ويقيم الشواظ الشمسي جسرًا بين البقع الشمسية وهي مناطق ذات مجالات مغناطيسية شديد لأقطاب مغناطيسية متعاكسة .

ويتغير موقع الأقطاب المغناطيسية للأرض على مدى فترات زمنية طويلة ويقع القطب الشمالي حاليًا على نحو 1600 km جنوب القطب الشمالي الجغرافي على امتداد خط الطول 100° غربًا . فإذا كنت عند خط طول آخر غير هذا الخط فإن البوصلة التي معك

لابد من تصحيح قراءتها نحو انحراف الشرق أو انحراف الغرب حتى يمكن معرفة اتجاه الشمال الحقيقى . ويسجل مقدار هذا التصحيح على خرائط مخصصة للملاحة .

وكما هو موضح بالشكل 4-19 فإن المجال المغناطيسى للأرض يكون موازيًا تقريبًا لسطح الأرض في المناطق الاستوائية ويكون عموديًا تقريبًا على سطح الأرض بالقرب من القطبين . وعلى وجه العموم ، فإن إبرة البوصلة المعلقة على محور أفقي عند النقطة P في نصف الكرة الشمالي سوف تشير بزاوية مقدارها θ أسفل الخط الأفقي . وتسمى هذه الزاوية بزاوية ميل المجال المغناطيسي للأرض .

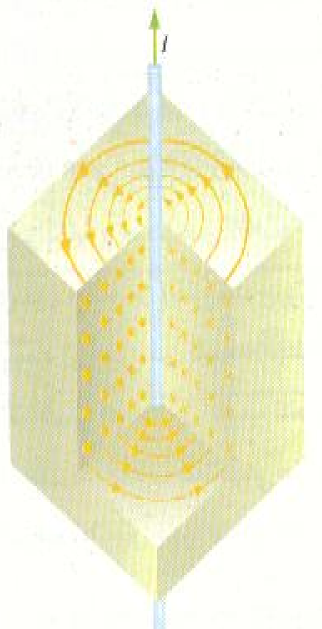
3-19 المجال المغناطيسى الناشئ عن تيار كهربى



شكل 5-19: يكون المجال المغناطيسى دوائر متمركزة حول السلك الحامل للتيار .

ليست المغناطيسيات هى المصدر الوحيد للمجالات المغناطيسية ، فقد اكتشف هانز كريستيان أورستد عام 1820 أن التيار الكهربى المار فى سلك ما يجعل إبرة بوصلة قريبة منه تنحرف . ويدل هذا على أن **التيار الكهربى المار فى سلك قادر على توليد مجال مغناطيسى** . وقد كانت تجربة أورستد هى أول بيان عملى على أن الظواهر الكهربية والمغناطيسية وثيقة الصلة ببعضها البعض . وقد أصبحنا نعرف الآن ، بناء على العديد من أنواع التجارب الأخرى أن التيارات الكهربية تخلق بالفعل مجالات مغناطيسية . وبالإضافة إلى كل هذا فالمجال المغناطيسى لمغناطيس ما هو أيضا نتيجة حركة الشحنات كما سنرى لاحقا .

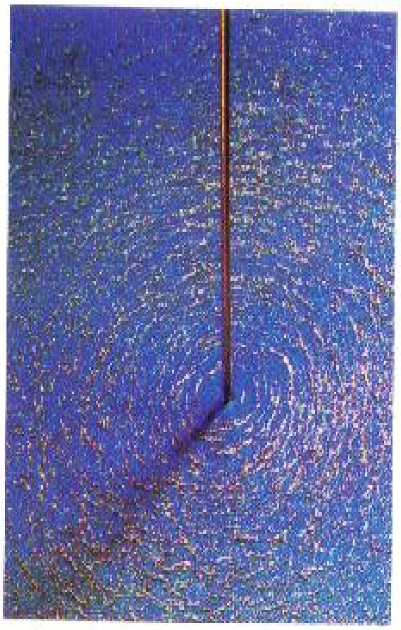
لقد درس أورستد المجال المغناطيسى الذى يحيط بسلك مستقيم ، طويل يمر داخله تيار في الاتجاه المبين في الشكل 5-19 . وعندما توضع بوصلة بجوار السلك فإن الإبرة ستستقر بحيث يكون طولها منطبقاً مع المماس لدائرة متحدة المركز مع السلك . والنتيجة هى أن المجال المغناطيسى يتواجد فى شكل دوائر حول السلك وكما هو متوقع فإن شدة المجال تكون أعظم ما يمكن بالقرب من السلك ، ويوضح الشكل 6-19 صورة ثلاثية الأبعاد للمجال المغناطيسى . (وفى هذا الرسم وما يأتى بعد ذلك من رسوم توضيحية فإن الرمز (•) يدل على أن السهم يتجه نحو القارئ بينما يدل الرمز (×) على أن السهم متجه بعيداً عن القارئ والرمزان يعبران عن مقدمة السهم ومؤخرته وهى التى تبين اتجاه المجال المغناطيسى) .



شكل 6-19: يلتف المجال المغناطيسى فى دوائر حول سلك مستقيم طويل . ويتناقص المجال كلما ابتعدنا عن السلك .

هناك قاعدة بسيطة هى **قاعدة اليد اليمنى** وتستخدم لتذكر اتجاه المجال المغناطيسى حول سلك ما . فإذا كنت قابضًا على السلك بيدك اليمنى وكان إبهامك يشير إلى اتجاه التيار فإن الأصابع المضمومة ستمثل الدوائر المحيطة بالسلك فى اتجاه المجال (الشكل 7-19) .


يمكننا توليد مجالات مغناطيسية شديدة بواسطة تيارات ضخمة ، مثل هذا المغناطيس الكهربى الصناعى ، المستخدم فى التقاط الحديد الخردة .


تصطف برادة الحديد تحت تأثير المجال المغناطيسى الناتج عن التيار المار فى السلك المستقيم .


شكل 7–19:
عندما تقبض على سلك حامل لتيار فى يدك اليمنى فإن الإبهام يشير إلى اتجاه التيار بينما تلتف الأصابع حول الشكل فى نفس اتجاه المجال المغناطيسى .

الفيزيائيون يعملون دانيال . ن . بيكر معمل الفيزياء الجوية والفضائية بجامعة كولورادو



أعمل فى مجال علمى يطلق عليه فيزياء الفضاء أو الفيزياء الفضائية . ويكرس هذا النوع من البحوث لدراسة الجسيمات المشحونة (الإلكترونات والبروتونات والنوى الأثقل من ذلك) التى يعج بها نظامنا الشمسى . وكذلك المجالات المغناطيسية والكهربية التى تحكم حركة تلك الشحنات . ومجال تخصصى الدقيق هو أعلى جزء من جو الأرض وهو **الغلاف المغناطيسى** أو الماجنيتوسفير . وهذه المنطقة مأهولة بغاز رقيق للغاية (حيث تصل كثافته من 10 إلى 1000 جسيم فى السنتيمتر المكعب) ويتكون معظمه من إلكترونات وبروتونات ونوى ذرى (مثل الأكسجين المشحون الذى يصعد إلى أعلى من طبقات الجو السفلى) ؛ ويمسك بها جميعًا معًا المجال المغناطيسى المنبعث من القلب المنصهر للأرض والمكون من الحديد والنيكل . وقد اكتشف هذا الغلاف المغناطيسى منذ 35 سنة بواسطة أول قمر صناعى ولا يزال تحت الدراسة بواسطة أجهزة فضائية أكثر تعقيدًا من ذلك الحين .

وقد بدأ شغفى ببحوث الفضاء وأنا لا زلت طفلاً فى التاسعة عام 1957 عندما قرأت عن بعثة « سبوتنيك » الروسية وعن اكتشاف جيمس فان آلن للأحزمة الإشعاعية حول الأرض . وقررت عندئذ أننى أحب أن أصبح متخصصًا فى فيزياء الفضاء ، بل وأن أعمل مع البروفيسور فان آلن يومًا ما وقد كنت محظوظًا للغاية أن أتمكن من الدراسة مع البروفسيور فان آلن عندما التحقت بالدراسات العليا عام 1970 ، واشتركت معه فى تصميم واختبار الأجهزة التى أطلقت فيما بعد فى أول بعثة إلى النظام الشمسى الخارجى . وقد أثبتت سفينتا الفضاء « بايونير 10 و 11 » أن كوكبى المشترى وزحل لهما أيضًا غلاف مغناطيسى

« ماجنيتوسفير » . ونعتقد حاليًا أن كل الكواكب لها فى الواقع مناطق تشبه الغلاف المغناطيسى ، ونعرف أيضًا أن شمسنا والنجوم النيوترونية وحتى المجرات لها ـ فى الحقيقة ـ مناطق تحيط بها ويمكن أن يطلق عليها بحق أغلفة مغناطيسية .

وأحد أعظم الفوائد التى نجنيها من دراسة الغلاف المغناطيسى للأرض هو أنه قريب نسبيًا من كوكبنا ، ولكى نبعث بسفينة فضاء إلى كواكب أخرى (مثلما حدث مع بعثات فويجر وبايونير) فإن الأمر يستغرق سنوات أو حتى عقود لأن الكواكب بعيدة جدًا عنا . ولتتخيل ـ مجرد تخيل ـ محاولة الذهاب إلى نجوم أخرى : إن السفر ـ ولو بسرعة الضوء ـ سوف يستغرق عشرات وربما مئات السنين لكى نصل إلى أقرب نظام نجمى منا . وتتيح لنا دراسة العمليات التى تجرى فى الغلاف المغناطيسى للأرض . أن نفكر فى أنماط لتعجيل (لتسارع) ، وتحويل الطاقة ، والحركة المركبة للجسيمات المشحونة وأهم من ذلك كله أننا سنكون عندئذ قادرين على إرسال أجهزة إلى الغلاف المغناطيسى للتحقق من أفكارنا ونماذجنا النظرية أن الغاز المكون من جسيمات مشحونة والمجال المغناطيسة ، الموجود فى الغلاف المغناطيسى للأرض (وهو ما يسمى بلازما) يعتبر سمة مميزة لنحو 99 فى المائة من الكون أى أن ما نصل إليه من نتائج يمكن تطبيقه على نظم كونية أخرى . ونستطيع القول من هذا المنظور أن الغلاف المغناطيسى للأرض أو الماجنيتوسفير ما هو إلا معمل كونى عملاق .

ولقد صار البشر يستخدمون البيئة الفضائية أكثر فأكثر منذ أن بدأ عصر الفضاء . فقد أصبح لدينا الآن أقمار صناعية فى الفضاء تساعد على البث التليفزيونى على مستوى العالم أجمع ، كما أن لدينا اتصالات فورية تقريبًا بين مختلف القارات . ويستخدم الفضاء أيضًا للمراقبة ليساعدنا فى الدفاع عن أنفسنا ، وتقوم بعض سفن الفضاء المعقدة بتحذيرنا من الأعاصير ، والكوارث الضخمة المرتبطة بالظواهر الجوية . بل ويتم مراقبة التغيرات ذات المدى البعيد فى جو الأرض والمحيطات والحياة النباتية ، بشكل منتظم من الفضاء وقد توصلنا إلى أن كل هذه الوظائف المعقدة لاستخدام الفضاء معرضة بشدة للأشعة العدائية القادمة من الفضاء ؛ ومنها ـ مثلاً ـ جسيمات حزام فان آلن والانطلاقات العنيفة للإشعاع المرتبط بالانفجارات الشمسية وكلها قادرة على تدمير المكونات الإلكترونية للأقمار الصناعية تمامًا . وهكذا فإن من المظاهر التطبيقية لعملى ، فهم والتنبؤ بتأثيرات البيئة الفضائية على الأقمار الصناعية العاملة .

واعتبر نفسى محظوظًا للغاية لأننى كنت قادرًا على إدراك الحلم الذى بدأ مع فجر عصر الفضاء . فقد أتيحت لى الفرصة لدراسة المشترى وزحل وعطارد والشمس بالإضافة إلى الأرض . وعند إجراء المقارنات والمقابلات بين جيراننا فى الفضاء ، فإننا توصلنا إلى فهم جيد للركن الضئيل الذى نحتله من الكون . ونتطلع حاليًا إلى ما هو أبعد فأبعد باستخدام التلسكوبات الأكثر قوة ولكننا نعود دائمًا إلى خبراتنا ببيئة الأرض حتى نستوعب ما نراه . ولهذا قد يكون أكثر ما يثير الاهتمام هو أنه مهما فتحنا من نوافذ لنطل على الفضاء ، سنظل دائمًا ننظر من خلال النافذة التى فتحناها من فوق كوكبنا الأرض .

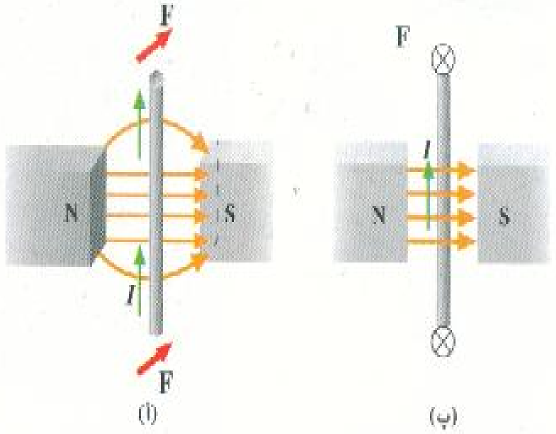
19-4 القوة المؤثرة على تيار يمر فى مجال مغناطيسى خارجى ؛ قاعدة اليد اليمنى

لم نناقش حتى الآن سوى الملامح الوصفية للمجال المغناطيسى وكيفية تحديد اتجاهه ولكى يكتمل الوصف لابد أن نبحث عن وسيلة لتحديد وقياس مقدار هذا المجال ويكمن الحل فى ما لوحظ من أن السلك الحامل للتيار إذا وجد فى منطقة بها مجال* مغناطيسى فإن السلك يتعرض لقوة ما .

يتعرض السلك الحامل لتيار خلال منطقة بها مجال مغناطيسى خارجى لقوة بسبب ذلك المجال .

* المجال المغناطيسى الخارجى هو ما يمكن إيجاده بواسطة تيارات أو مغناطيسات تقع خارج نطاق السلك الحامل للتيار . ولا يشمل هذا المجال الخارجى المجال الذى ينشؤه التيار المار فى السلك نفسه .

وكمثال على هذه الظاهرة دعنا نتدبر الموقف الموضح فى الشكل 8-19 (أ) .

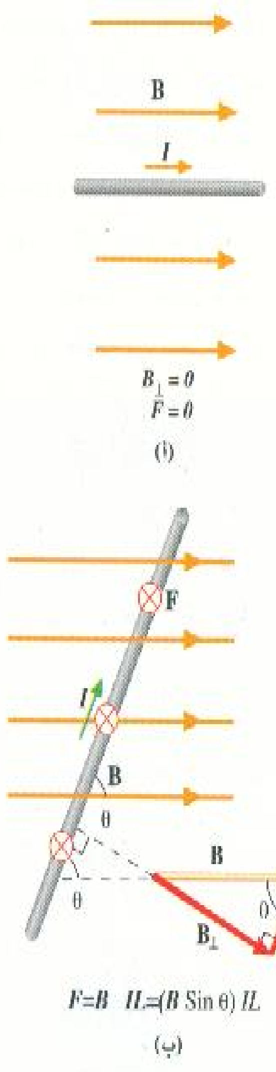


شكل 8-19:
المجال المغناطيسى الخارجى (الخطوط البرتقالية) الذى يسببه قطبا القضيب المغناطيسى هو الذى يجعل السلك الحامل للتيار يتعرض لقوة . (أ) رسم منظور ثلاثى الأبعاد . (ب) منظر جانبى ، يوضح أن B ، I و F فى تعامد متبادل فيما بينهما .

وُضع السلك الحامل للتيار I الذى يمر رأسيًا إلى أعلى فى مجال مغناطيسى خارجى موجود بين قطبى مغناطيس . وتدل التجارب على أن السلك يتعرض لقوة متعامدة مع كل من المجال المغناطيسى واتجاه التيار . وإذا عكس اتجاه التيار فإن اتجاه القوة ينعكس هو الآخر بحيث يكون خارجًا من الصفحة ويمكننا ملاحظة ذلك بوضوح أكبر إذا رسمنا الموقف فى بعدين ، كما فى الشكل 8-19 (ب) . ويلاحظ أن خط السلك وخط المجال المغناطيسى الذى يتقاطع معه يحددان مستوى ، وهو مستوى الصفحة . والقوة التى يتعرض لها السلك تكون متعامدة دائمًا على هذا المستوى ؛ وفى هذه الحالة بالذات تتجه القوة إلى داخل الصفحة . وسنتناول اتجاه هذه القوة بمزيد من التفصيل فى القسم التالى . أما الآن فسنركز على مقدار هذه القوة وتعريف مقدار المجال المغناطيسى .

وسنعتبر - من أجل البساطة - أن شدة المجال المغناطيسى الخارجى منتظمة على امتداد طول السلك L . فإذا كان التيار والمجال المغناطيسى متعامدين كما فى الشكل 8-19 ، فقد وجد أن القوة المؤثرة على السلك تتناسب مع كل من التيار وطول السلك الموجود داخل المجال المغناطيسى . وسوف نستخدم الرمز **B** فى الدلالة على المجال المغناطيسى ، ونعرِّف مقدار (أو شدة) المجال كما يلى :

$$B = \frac{F}{IL} \qquad (\mathbf{I} \text{ متعامد } \mathbf{B})$$



شكل 9-19:
عندما يكون السلك الحامل للتيار منغمسًا فى مجال مغناطيسى خارجى فإن القوة المؤثرة على السلك تتناسب مع مركبة B المتعامدة مع السلك . حدد اتجاه F فى الجزء (ب) من الشكل 9-19 .

وتدل هذه المعادلة على أن وحدات B هى قوة لكل متر أمبير وتسمى تسلا (T) فى النظام الدولى للوحدات (SI) :

$$1\,T = 1\,N/m\,.\,A$$

وقد نقابل أحيانًا وحدات غير وحدات SI للمجال المغناطيسى ، وتسمى هذه الوحدات جاوس (G) حيث تكون $1\,G = 10^{-4}\,T$. ومن قبيل المقارنة فإن المجال المغناطيسى للأرض من الرتبة $5 \times 10^{-5}\,T$ ، فى حين أن B بالقرب من قضيب مغناطيسى قوى قد يصل إلى $0.1\,T$.

أما اتجاه **B** فقد حددناه بالفعل من قبل على أنه الاتجاه الذى تشير إليه إبرة البوصلة . وهكذا يكتمل لدينا وصف متجه المجال المغناطيسى **B** .

وخطوط المجال (ومن ثم **B**) فى الشكل 8-19 متعامدة مع اتجاه التيار (أى مع السلك) . وسنحاول أن نعرف ما يحدث عندما لا يكون الاثنان متعامدين . سنفترض أن خطوط المجال تتوازى مع السلك كما فى الشكل 9-19 (أ) . فى هذه الحالة لا يتعرض السلك لأية قوة . **أى أن التيار الموازى (أو الموازى ومتضاد) لخط مجال مغناطيسى خارجى لا يتعرض لأية قوة ناتجة عن هذا المجال** . ومن الواضح أن الاتجاه النسبى لخطوط المجال واتجاه التيار ذات تأثير بالغ .

إذا كانت الزاوية المحصورة بين **I** و **B** هى θ ، فإن القانون العام للقوة التى يؤثر بها المجال على السلك هى

$$F = BIL \sin\theta$$

وكما يوضح الشكل 9-19 (ب) فإن هذه العلاقة مكافئة للعلاقة :

$$F = B_{\perp}IL \qquad (19\text{-}1)$$

يلاحظ أن هذه العلاقة متفقة مع الحالتين الحديثتين ؛ أى عندما $\theta = 0$ ، $(F = 0)$ و $\theta = 90^\circ$ $(F = BIL)$.

مثال توضيحى 1-19

فى الشكل 9-19 (ب) ، افرض أن $B = 2.0$ G ، $\theta = 53^\circ$ ، و $I = 20$ A . أوجد القوة المغناطيسية المؤثرة على سلك طوله 30 cm .

استدلال منطقى : نعرف أن $B_{\perp} = B\sin\theta$

$$= B\,(0.799)$$

وبتحويل B إلى وحدات SI ، يصبح لدينا $B = 2.0\ G = 2.0\times10^{-4}$ T . وإذن :

$$F = B_{\perp}IL = (2.0\times10^{-4}\ \text{T})\,(0.799)\,(20\ \text{A})\,(0.30\ \text{m}) =$$

$$= 9.58\times10^{-4}\ \text{N}$$

تمرين : أوجد قيمة F إذا كان السلك متعامدًا مع خطوط المجال .

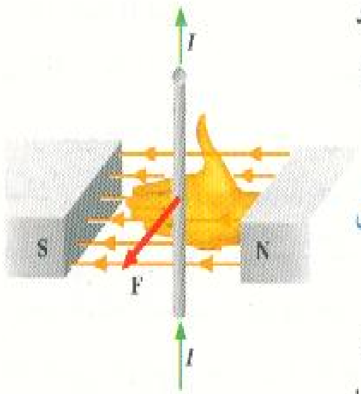
الإجابة : 12.0×10^{-4} N

5-19 امتداد لقاعدة اليد اليمنى

أشرنا فى القسم السابق إلى أن اتجاه القوة التى يتعرض لها السلك الحامل للتيار فى وجود مجال مغناطيسى يكون متعامدًا على المستوى الذى يحدده كل من السلك والمجال .

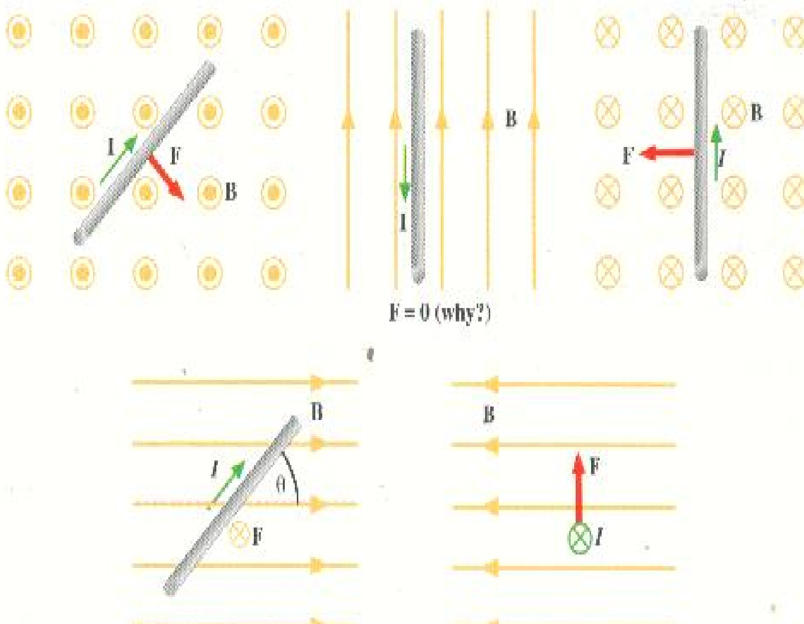
وسنقدم الآن امتدادًا بديهيًا بسيطًا لقاعدة اليد اليمنى (القسم 4-19) يعيننا علـى تحديد اتجاه القوة التى يتعرض لـها السلك . إنها إذن مساعدة بديهية لتذكر اتجاه القوة ، ولا يجب أن نربطها بأى معنى فيزيائى حقيقى ، نظرًا لكونها ـ ببساطة ـ وسيلة تذكر .

اجعل أصابع يدك اليمنى تشير فى اتجاه خطوط المجال المغناطيسى بينما يشير إبـهامك فـى اتجاه التيار ، أما القوة التى تؤثر على السلك فتكون فى الاتجاه الذى تدفعه راحة يدك .



شكل 10-19:
قاعدة اليد اليمنى : تشير الأصـابع فـى اتجاه B ، وتشير الإبهام فى الاتجاه العام للتيار وتندفع راحة اليد فى اتجاه F .

وتتمثل هذه القاعدة فى الشكل 10-19 ولا يجب أن يكون لديك الآن أى لبس بشأن هذه النقطة . إن خط متجه المجال المغناطيسى B وخط السلك يحددان معًا مستوى ما (وهو مستوى الصفحة فى الشكلين 9-19 ، 10-19) . وتكون القوة المؤثرة على السلك عمودية دائمًا على هذا المستوى . وبمجرد أن تعرف هذا ، فإن محض التخمين سيتيح لك فرصة نسبتها 50 فى المائة للحصول على الاتجاه الصحيح للقوة ، إذ قـد يكـون إما داخلة فى الصفحـة أو خارجـة منـها . ولكـى تحـدد أى البديلين هـو الصحيـح عليك استخدام القاعدة المصورة فى الشكل 10-19 . واتجـاه القـوة فـى الشكـل 10-19 يكـون نحوك ، خارجًا من الصفحة وباستخدام نفس القاعدة يمكنك إدراك أن اتجاه القـوة فـى الشكلين 8-19 و 9-19 إلى داخل الصفحة .



شكل 11-19 :
حدد اتجاه القوة المغناطيسية فى كل حالة .

مثال توضيحى 2-19

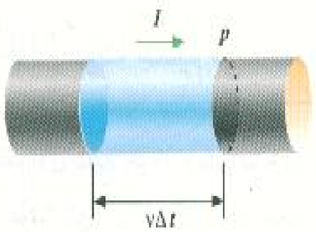
استخدم قاعدة اليد اليمنى لإيجاد القوة المغناطيسية فى الشكل 11-19 . وكما ذكرنا من قبل فإن الرمز ⊗ يدل على متجه فى اتجاه إلى داخل الصفحة والرمز ⊙ يدل علـى متجه خارج من الصفحة .

19-6 القوى المغناطيسية المؤثرة على شحنات متحركة

التيار ـ كما عرفناه ـ هو نتيجة لحركة شحنـات موجبة . والسـؤال الـذى يطـرح نفسـه بوضوح عند هذه النقطة هو : ما هو أثر مجال مغناطيسى خارجى على شحنات تتحـرك بحرية ، إذا لم تكن هذه الشحنات مقيدة بالحركة داخل سلك ولكـى نجـهز الـرد علـى هذا السؤال علينا أن نبدأ باستخدام ما توصلنا إليه بالفعل فيما يتعلق بالقوة المؤثرة علـى ناقل شحنة منفرد داخل سلك ما .

ولكى تفعل ذلك فإننا سنقسم القوة الكلية المؤثرة علـى الطـول L علـى عـدد نـاقلات الشحنة فى هذا الطول . فإذا كانت مساحة المقطع المستعرض للسلك هـى A ، كمـا فـى الشكل 12-19 فإن حجم الطول L منه يكون LA . وإذا كان هناك n_u ناقل شحنة فـى وحدة الحجوم ، فإن عدد ناقلات الشحنة فى الطول L هو n_uAL . ومن ثم :

$$\text{القوة المؤثرة على شحنة واحدة} = \frac{\text{القوة المؤثرة على السلك } L}{\text{عدد ناقلات الشحنة فيه}} = \frac{B_\perp IL}{n_u AL} = \frac{B_\perp I}{n_u A}$$



شكل 12-19:
فى زمـن مقـداره Δt سـتعبر الشحنـات الموجودة فى الطول $v\Delta t$ خـلال مسـاحة المقطع المستعرض عند P .

ولكننا لا زلنا بحاجة للتعبير عن التيار بدلالة الشحنات المنفردة التى تكونه . وناقل الشحنة يتحرك مسافة معينة فى اتجاه التيار فـى زمـن مقداره Δt ، فـإذا كـان متوسط سرعة الناقل هو v ، فإن المسافة التى يتحركها فى زمن مقداره Δt هو $v\Delta t$. وعلـى هـذا ، ففى فترة زمنية مقدارها Δt ، تكون كل ناقلات الشحنة فى طول مقداره $v\Delta t$ إلى اليسار مـن النقطة P فى الشكل 12-19 متحركة خلال المقطع المستعرض عند P . وحيث أن حجم هـذا المقطع من الطول هو $AV\Delta t$ ، ولأن لدينا n_u من ناقلات الشحنة فى وحدة الحجـوم ، يكـون عدد ناقلات الشحنة التى تعبر P فى زمن مقداره Δt هو $n_uAv\Delta t$. وكل ناقل يحمل شحنـة مقدارها q ولـهذا :

$$I = \frac{\text{الشحنة المارة بالنقطة } P \text{ فى زمن مقداره } \Delta t}{\Delta t} = \frac{qn_uAv\Delta t}{\Delta t} = qn_uAv$$

ويمكننا الآن استخدام قيمة I هذه فى التعبير الخاص بالقوة المؤثرة على شحنة واحدة .

$$F = \frac{B_\perp I}{n_u A} = qvB_\perp$$

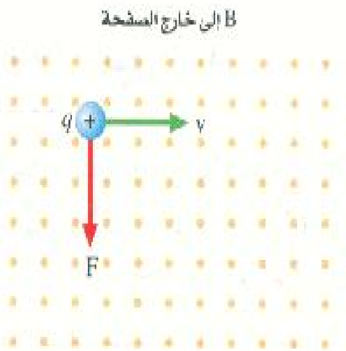
وعلى هذا نستنتج ما يلى :

تتعرض شحنة مقدارها q متحركـة بسـرعة مقدارهـا v عموديـا علـى مجـال مغناطيسى مقداره $B_\perp$ لقوة مغناطيسيـة مقدارها

$$F = qv\,B_\perp \qquad (19\text{-}2)$$

ونستطيع استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه هذه القوة . ونقطة البداية هى تذكر

أن اتجاه التيار يعرف بأنه اتجاه سرعة الشحنات الموجبة المتحركة . وعلى هذا ، إذا أشرنا بأصابع اليد اليمنى فى اتجاه **B** وبالإبهام الأيمن فى اتجاه السرعة **v** ، فإن راحة اليد (الكف) ستدفع فى اتجاه القوة المؤثرة على الشحنة ويمكنك الرجوع إلى الشكل 13-19 كمثال على هذا الموقف حيث نرى شحنة مقدارها q تتحرك بسرعة **v** خلال مجال مغناطيسى **B** يتجه خارجًا من الصفحة . والمتجهان المتقاطعان **B** و **v** يحددان مستوى (الرأسى) ، والقوة **F** المؤثرة على q عمودية على هذا المستوى . وباستخدام قاعدة اليد اليمنى سنجد أن **F** ستكون فى الاتجاه الموضح فى الشكل 13-19 . ويلاحظ أن المعادلة 2-19 تدل على أن اتجاه **F** ينعكس عندما تكون شحنة الجسيم سالبة . بمعنى أنه لو كانت الشحنة فى الشكل 13-19 سالبة ، لكانت القوة **F** متجهة إلى أعلى بدلاً من إلى أسفل .

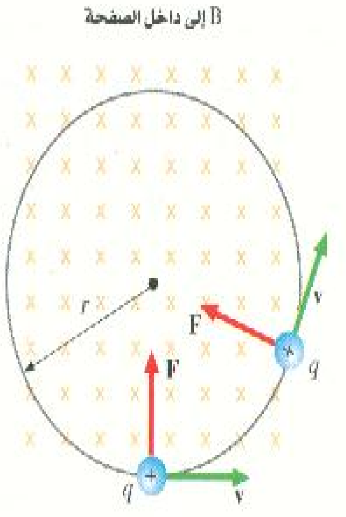


شكل 13-19:
استخدام قاعدة اليد اليمنى لإيجاد اتجاه F المؤثرة على الشحنة .

هناك ملاحظة مهمة فيما يتعلق بحقيقة أن القوة تكون دائمًا متعامدة مع السرعة . وحيث أن متجه السرعة يكون دائمًا ولحظيًا مع اتجاه الحركة ، فإن القوة لن يكون لها مركبة فى اتجاه الحركة مما يعنى أن القوة لن تبذل شغلاً على الشحنة ولن تغير من ثَمَّ من طاقة حركتها . . وسيكون التأثير الوحيد للقوة هو أن تغير اتجاه حركة الشحنة .

19-7 حركة جسيم فى مجال مغناطيسى (قوة لورنتز)

سنقوم الآن بتتبع حركة جسيم مشحون فى مجال مغناطيسى كما يوضحها الشكل 14-19 . لقد عرفنا لتونا أن السرعة v لن يتغير مقدارها بتأثير القوة (وكل ما سيتغير هو اتجاه السرعة) . فلو افترضنا الآن أن المجال المغناطيسى منتظم (أى أن له نفس الشدة ونفس الاتجاه فى كل مكان) فإن مقدار القوة المغناطيسية $F = qvB$ سيظل ثابتًا . إن عليك أن تثبت أن اتجاه القوة المبين فى الشكل 14-19 هو الاتجاه الصحيح .

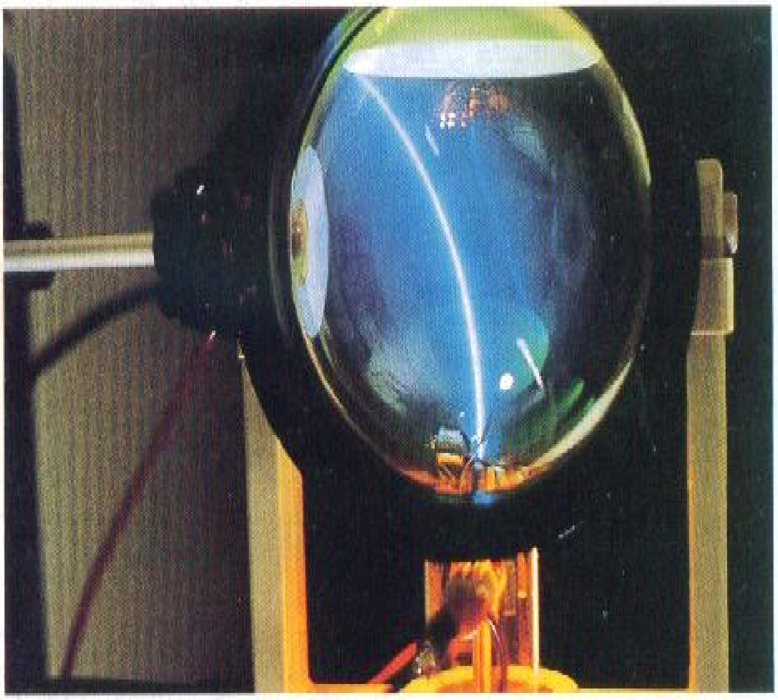


شكل 14-19:
يتبع الجسيم المشحون فى حركته مسارًا دائريًا داخل مجال مغناطيسى منتظم .

لقد جابهنا فى مرات عديدة من قبل موقفاً ديناميكيًا مشابهًا . ومن ذلك حالتان كان فيهما الجسم تحت تأثير قوة ثابتة ومتعامدة باستمرار مع اتجاه الحركة وهما : (1) حالة كرة تتأرجح فى دائرة وهى معلقة فى طرف خيط مثبت و (2) حالة الحركة فى مدارات دائرية تثاقلية . والقوة فى كل من هاتين الحالتين تجعل الجسم يتحرك فى مسار دائرى بسرعة ثابتة المقدار . وتوصف هذه الحركة بدلالة عجلة (تسارع) جذب مركزى هى v^2/r (المعادلة 9-7) حيث r هو نصف قطر الحركة الدائرية . وفى الحالة الراهنة فإن القوة المسئولة عن هذه العجلة (التسارع) هى qvB ، أى القوة المغناطيسية المؤثرة على الشحنة q . ويتيح لنا قانون نيوتن الثانى أن نكتب ما يلى :

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

حيث m هى كتلة الجسيم المشحون . وعلى هذا تدور الشحنة q التى كتلتها m وتتحرك فى مجال مغناطيسى منتظم **B** يتجه عموديًا على سرعة الشحنة **v** ، فى دائرة نصف قطرها :



تنحنى حزمة من الإلكترونات علــى هيئــة دائرة عندما تنتقل خلال منطقة بها مجـــال مغناطيسى خارجى . هل يمكنك تحديد اتجاه المجال المغناطيسى فى هذه الصورة ؟

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (19\text{-}3)$$

فإذا كانت الشحنة فى الشكل 14-19 سالبة فإن اتجاه القوة سينعكس وبذلك تدور الشحنة السالبة فى دائرة فى اتجاه حركة عقارب الساعة .

هناك فرق مهم جدًا ، على المرء تذكره ، بين القوة الكهربية والقوى المغناطيسية المؤثرة على الشحنات ، ويمكن صياغة هذا الفرق كما يلى :

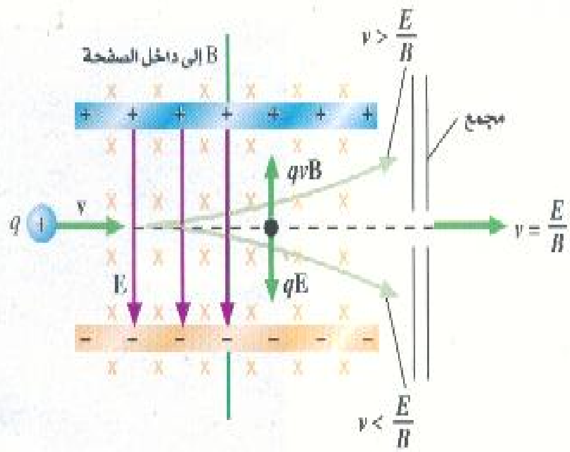
تكون القوة الكهربية qE فى اتجاه $\mathbf{E}$ (أو فى عكس اتجاه $\mathbf{E}$ بالنسبة للشحنات السالبة) ، أما القوة المغناطيسية qvB فتكون متعامدة مع $\mathbf{B}$. ولهذا فإن المجالات الكهربية E قادرة على بذل شغل على الشحنات بينما لا يقدر على ذلك المجال المغناطيسى B .

19-8 تطبيقات على القوى المغناطيسية المؤثرة على الشحنات

إن خواص الجسيمات التى تتكون منها الذرات والجزيئات ، يمكن دراستها عند ملاحظة سلوكها فى وجود مجالات E ومجالات B . وتحمل هذه الكيانات الدقيقة للغاية من المادة شحنات تتراوح قيمتها بين شحنة إلكترونية واحدة e أو قدر ذلك عدة مرات . وسنستعرض بإيجاز ثلاثة من هذه التطبيقات .

جهاز انتقاء السرعات

يوضح الشكل 15-19 زوجًا من الألواح المشحونة المتوازية ، المغمورة فى مجال مغناطيسى يتجه إلى داخل الصفحة . وكما مر علينا عدة مرات من قبل فإن اللوحين المتوازيين يخلقان مجالاً كهربيًا منتظمًا فيما بينهما ويتجه من اللوح الموجب إلى اللوح السالب .



شكل 19-15:
يقوم جهاز انتقاء السرعات بإمرار جسيمات دون أى انحراف لأنها تحقق شرط تساوى القوة الكهربية qE والقوة المغناطيسية qvB المؤثرتين عليها .

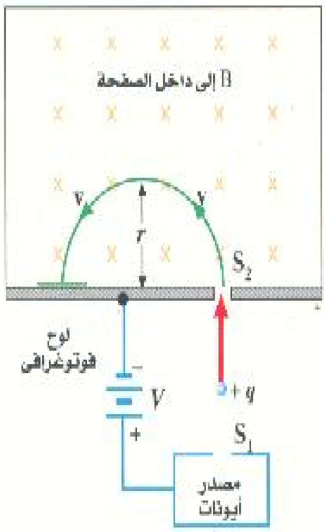
ويسمى هذا الجهاز باسم جهاز **انتقاء ذى مجالين متعامدين** وذلك بسبب اتجاه كل من المجال المغناطيسى والمجال الكهربى . ويحفظ الجهاز فى غرفة تفريغ بحيث تكون مقاومة الهواء مهملة .

افترض الآن أن جسيمًا مشحونًا $(+q)$ يدخل إلى المنطقة التى يتعامد فيها المجالان بسرعة **v** موزاية للوحين ، كما هو مبين فى الشكل 15-19 . ولابد أنك تستطيع إثبات أن القوة الكهربية والقوة المغناطيسية متعاكستان فى الاتجاه كما يوضح الرسم . ولهذا فإن الجسيم سوف ينحرف بشكل عام إما إلى أعلى أو إلى أسفل اعتمادًا على أى من القوتين أكبر من الأخرى .

وستمر الشحنة خلال منطقة التعامد بدون انحراف ، فقط إذا تساوت القوتان المتعاكستان . ويتطلب هذا الشرط أن :

$$qE = qvB \qquad \text{أو} \qquad v = \frac{E}{B}$$

والجسيمات التى تتحرك بهذه السرعة تمامًا سوف تمر من خلال فتحة صغيرة تقع على خط واحد مع المحور المركزى للجهاز ، أما الجسيمات التى تتحرك بأية سرعات أخرى غير هذه السرعة فإنها ستمنع من المرور . وهكذا فإن هذا الجهاز يتيح لنا - إذا ضبطنا قيم E و B - أن ننتقى جسيمات تتمتع كلها بنفس مقدار السرعة من بين حزمة الجسيمات التى لها سرعات مختلفة . ولابد أنك قادر على إقناع نفسك بأن النتيجة نفسها تطبق على الشحنات السالبة . كما أنك لابد أن ستستغرق بعض الوقت لتتثبت أن وحدات SI الخاصة بالنسبة E/B هى بالفعل متر لكل ثانية (m/s) .



شكل 19-16:
جهاز مطياف الكتلة . ويمكن تعيين كتلة أيون ما بمعرفة الموقع الذى يضرب فيه الأيون لوحًا فوتوغرافيًا .

مطياف الكتلة

لقد ناقشنا فى الفصل الثانى الكتل الماكروسكوبية (الكبيرة) وعرفناها منسوبة إلى الكيلو جرام العيارى الدولى . على أن أكثر قياسات الكتلة دقة هى الخاصة بذرات العناصر المختلفة . وهناك جهاز يعرف باسم **مطياف الكتلة** وتستخدم فيه القوة المغناطيسية المؤثرة على ذرات مشحونة (أو أيونات) لقياس الكتل إلى دقة تصل إلى سبعة أو ثمانية أرقام عشرية معنوية . ويبين الشكل 16-19 رسمًا تخطيطيًا لهذا الجهاز حيث يرى مصدر

للأيونات محفوظ داخل غرفة مفرغة ، كما ترى منطقة بها مجال مغناطيسى منتظم وجهد كهربى بين مصدر الأيونات ومنطقة المجال المغناطيسى . ويبدأ العمل بأن تتأين ذرات غاز بواسطة قذفها بالإلكترونات ثم تخرج الأيونات من فتحة مصدر الأيونات S_1 . ثم تعجَّل الأيونات نحو مدخل الفتحة S_2 بواسطة جهد معلوم V . أى أن الأيونات تدخل المجال المغناطيسى ولها طاقة حركة تعطى من المعادلة 3-17 وهى :

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = qV \qquad (19\text{–}4)$$

وقد تكون الشحنة q مساوية $+e$ أو $+2e$ ، إلخ اعتمادًا على درجة تأين الذرات وكثيرًا ما يحدث أن تستخدم ذرات منفردة التأين (أى أيونات وحيدة الشحنة) .

وبمجرد أن تدخل الأيونات إلى منطقة المجال المغناطيسى ، فإنها تتحرك بسرعة ذات مقدار ثابت ثم تدور بواسطة القوة المغناطيسية فى دائرة نصف قطرها معرَّف بالمعادلة 3-19 : $r = mv/qB$. وبحركتها فى نصف دائرة ، فإن الأيونات تصطدم بكشاف كلوح فوتوغرافى مثلاً يقع على مسافة $2r$ من الفتحة S_2 . وبحل المعادلة 4-19 لإيجاد v ثم التعويض بها فى المعادلة 3-19 ، نستطيع الحصول على معادلة تحديد كتلة الأيون . وسنبدأ أولاً بالحصول على $v^2 = 2qV/m$. ثم

$$r^2 = \frac{m^2v^2}{q^2B^2} = \frac{m^2\left(\frac{2qV}{m}\right)}{q^2B^2}$$

وهذا يؤدى بدوره إلى العلاقة :

$$m = \frac{qB^2r^2}{2V} \qquad (19\text{–}5)$$

وحيث أن الكميات q ، V ، B معروفة ، فإن القياسات الدقيقة للمسافة $2r$ ستتيح لنا تعيين كتلة الأيونات . ومن الاستخدامات ذات الأهمية الخاصة لمطياف الكتلة ، قياس الفرق بين كتل النظائر المختلفة لنفس العنصر .

مثال 19-1

فى مطياف الكتلة الموضح فى الشكل 16-19 تُعجَّل ذرات منفردة التأين لعنصر من العناصر ، خلال فرق للجهد مقداره 1.000 kV ثم تدخل مجالاً مغناطيسيًا شدته 1.950 T . وقد لوحظ أن الأيونات تضرب حاجزًا يبعد مسافة مقدارها 2.088 cm عن S_2 . ما هى كتلة هذه الأيونات وما هو النظير الذى تمثله هذه الأيونات ؟ استخدم المعلومات الخاصة بكتل النظائر فى الملحق رقم 2 .

استدلال منطقى :

1

سؤال : كيف يمكن تحويل المعلومات المعطاة إلى الكميات المذكورة فى معادلة الكتلة

الواردة في المعادلة 5-19 ؟

الإجابة : إن لديك $B = 1.950\ T$ و $V = 1.000\ kV$. والمسافة من S_2 هي ضعف نصف القطر r ولذا يكون $r = 1,044\ cm$. والأيونات وحيدة الشحنة تحمل شحنة مقدارها $q = e = 1.602 \times 10^{-19}\ C$.

سؤال : وكيف أتمكن من الحصول على الكتلة النظائرية من هذا ؟

الإجابة : الكتل النظائرية مدرجة في الملحق رقم 2 بدلالة وحدة الكتل الذرية (u) وهي تعرّف بأنها جزء من اثنى عشر جزءًا من كتلة نظير الكربون 12 :

$$1\ u = 1.6606 \times 10^{-27}\ kg$$

وستعطيك المعادلة 5-19 الكتلة بالكيلو جرامات وعليك بعد ذلك تحويلها .

الحل والمناقشة : كتلة أيون واحد هي :

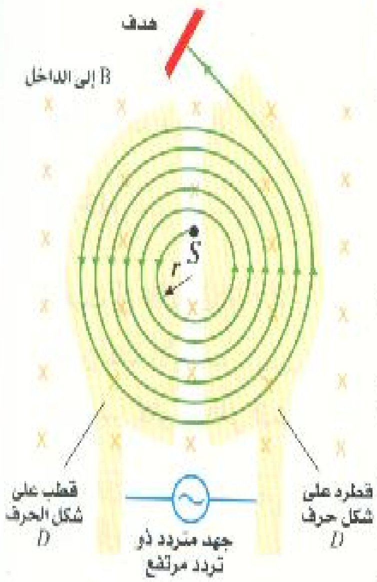
$$m = \frac{(1.602\times10^{-19}\ C)(1.950\ T)^2(1.044\times10^{-2}\ m)^2}{2(1.000\times10^3\ V)} = 3.320 \times 10^{-26}\ kg$$

ويبين الملحق رقم 2 أن كتلة ^{20}Ne هي $19.992440\ u$.

تمرين : احسب مدى التباعد بين أيوني ^{22}Ne و ^{20}Ne عندما يصطدمان بالكشاف (اللوح الفوتوغرافي) . **الإجابة : بالنسبة للنظير ^{22}Ne فإن $r = 1.095\ cm$ ، ومن ثم فإن التباعد بين الأيونين يكون $2(1.095 - 1.044)\ cm$ أو $0.102\ \ cm$. ودقة مطاييف الكتلة من الكفاءة بحيث تسمح بقياس مسافات كهذه بسهولة .**

السيكلوترون

إن كثيرًا مما نعرفه عن تركيب النواة الذرية قد تحقق عن طريق قذف هذه النوى بأيونات أو إلكترونات أو بروتونات ذات طاقات عالية جدًا . وعندما « نشق » نواة بمثل هذه القذائف فإننا نحصل بذلك على بعض تفاصيل تركيبها الداخلي . ويعتبر **السيكلوترون** واحدًا من الأجهزة المبكرة المستخدمة للحصول على طاقات عالية للغاية للجسيمات ، وذلك باستخدام مجالات مغناطيسية للتحكم في مساراتها . وقد تم صنع هذا الجهاز على يدى إ . أ . لورانس في جامعة كاليفورنيا ، بيركلي عام 1930 وقد بلغ من أهمية السيكلوترون كأداة فعالة في البحوث ، أن مُنح لورانس جائزة نوبل في الفيزياء عام 1930 .



شكل 17-19:
تخطيط بياني للسيكلوترون . تتسارع البروتونات (تُعجَّل) بواسطة المجال الكهربي الموجود بين القطبين ، وتحتفظ بحركتها في دائرة بفضل المجال المغناطيسي القوي . وتظل البروتونات تدور في حلزون نحو الخارج ، متحركة بسرعات أكبر فأكبر كلما زاد نصف قطر المدار ، حتى تتصادم في النهاية مع هدف مثبت خارج السيكلوترون .

ويوضح الشكل 17-19 العناصر الأساسية للسيكلوترون ، وكما هو الحال في مطياف الكتلة فإن هناك مجالاً مغناطيسيًا متعامدًا مع المنطقة التي تتحرك فيها الجسيمات المشحونة . وتتحرك الجسيمات في مسارات دائرية في غرفة مفرغة داخل قطبين على شكل D (لذا يسميان باسمه) وتفصلهما فجوة صغيرة . وفي تجربة نموذجية ، تنطلق البروتونات من المصدر S بالقرب من مركز الفجوة الواقعة بين القطبين . ومثلما يحدث في مطياف الكتلة ، فإن فرقًا للجهد بين القطبين يقوم بتعجيل البروتونات نحو أحد

القطبين . وبمجرد دخول البروتون إلى داخل القطب « دى » فإنـه « يبحـر » فـى دائـرة ويخرج من القطب فى نفس اللحظة تمامًا التى ينعكس فيـها الجـهد فيتعـرض البروتون للتعجيل (التسارع) من جديد ، فيدخل إلى القطـب (الـدى) المقـابل بسـرعة أكبـر ، ويدور فى دائرة أكبر . ويتكرر هذا المشهد مرات ومرات وفى كل مرة يُعجَّل البروتون إلى سرعات أكبر فأكبر وفى النهاية تُحرف البروتونات عند محيط السيكلوترون على هيئة حزمة ذات طاقة عالية مسدَّدة نحو هدف محدد .

ويكمن حجر الزاوية فى هـذا الجـهاز فى حقيقة أن الزمـن الـذى يستغرقه جسيم مشحون ليدور مرة واحدة فى مساره الدائـرة لا يعتمـد لا علـى سـرعة الجسـيم ولا علـى نصف قطر المسار . ومن السهل إثبات ذلك ، فالزمن الدورى T هو

$$T = \frac{\text{المسافة}}{\text{مقدار السرعة}} = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m v}{qBv} = \frac{2\pi m}{qB}$$

أما التردد f الذى هو $1/T$ ،

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

فإذا تم عكس قطبية الجهد المطبق على القطبين بتردد يسـاوى نصف هـذا المقـدار فإنـه يتوافق مع وصول البروتون إلى الفجوة ، بغض النظر عن مدى السرعة التى يتحـرك بـها البروتون أو مدى كبر نصف قطر مساره . وهكذا يتم تعجيل البروتون مـرات كثيرة قبـل أن يغادر السيكلوترون وهو مكتسب لطاقات عالية جدًا .



صنع إ. أ. لورانـس هـذا السـيكلوترون الأصلى عام 1932.

19-9 أثر هول

هناك عدد قليل من الظواهر الكهربية التى تشير بوضوح إلى إشارة ناقلات الشحنـة . ويمكن تفسير معظم التجارب بالنسبة لشحنات موجبـة تتدفق فـى اتجـاه مـا ـ وبنفس الدرجة بالنسبة لشحنات سالبة تتدفق فى الاتجاه المضاد . أما التجربة التى سـنصفها هنـا فهى واحدة من تجارب قليلة يتم فيها التمييز بين ناقلات الشحنة الموجبة والسالبة .

وسنعتبر الآن الدائرة المبينة فى الشكـل 18-19 (أ) حيـث تتصـل بطاريـة بطرفـى شريط منتظم موصل ورقيق ومصنوع ربما من فلز . وتقع النقطتان المتماثلتـان m و n عنـد نفس الجهد ولذلك لا يوجد بينهما فرق جهد ، وعندما يطبق مجال مغناطيسـى عموديًـا على الوجه العريـض للشريـط ـ كمـا فـى (ب) ، فـإن النقطتـين m ، n تصبحـان عنـد جهدين مختلفين . وسنبحث الآن فى كيفية تكون فرق الجهد هذا .

سنفترض أن الشحنات المتدفقة خلال الشريط موجبة . وترى إحدى هـذه الشحنـات فـى الشكل 18-19 (ب) . ونحن نعلم من قاعدة اليد اليمنى أن الشحنة ستجبر على الحركة إلى أعلى نحو m ، ومن ثم تصبح النقطة m موجبة ويظهر فرق للجهد بين النقطتـين m و n . ونكرر القول بأن النقطة m تكون موجبة عندما تكون ناقلات الشحنة موجبة .

وسنفترض الآن ـ كبديل ـ أن التيار مكون من شحنات سالبة متحركة نحو اليسار ، كما فى الشكل 18-19 (جـ) . ومرة أخرى تفيدنا قاعدة اليد اليمنى أن هناك قوة إلى أسفل تؤثر على الشحنات الموجبة المتحركة نحو اليسار . على أننا نتعامل الآن مع شحنات سالبة ، ولذا تتعرض هذه الشحنات إلى قوة متجهة إلى أعلى نحو m . أى أن النقطة m فى هذه الحالة ستصبح **سالبة الشحنة** .

إن لدينا هنا ، الآن ، طريقة حاسمة لتعيين إشارة ناقلات الشحنة فى المادة . وقد اكتشف هذا الأثر العالم الفيزيائى الأمريكى إدوين هول عام 1879 وسمى من وقتها باسمه وصار **أثر هول** . ويستطيع علماء العصر الحالى ـ باستخدام هذا الأثر ـ أن يتعرفوا على إشارة ناقلات الشحنة فى المواد الإلكترونية المحضرة حديثًا لكى تستغل فى مجال إلكترونيات الحالة الصلبة . ويشكل أثر هول أيضًا الأساس فى أداة تنتج على نطاق تجارى لقياس المجالات المغناطيسية .

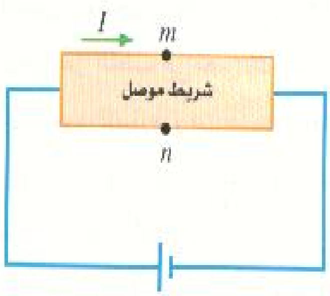
ويمكن أن يستخدم أثر هول لتعيين السرعة المتوسطة لناقلات الشحنة داخل موصل ما . وتسمى هذه السرعة المتوسطة **بسرعة الانسياق** نتيجة استجابة الشحنات للجهد المطبّق . ولكى ندرك كيفية تعيين هذه السرعة فسنعتبر ما يحدث عندما تتراكم الشحنات (+ أو −) على الجانب m ، بينما يصبح الجانب المقابل n فى حالة نقص من هذه الشحنات وبهذا يتكون مجال كهربى ومن ثم فرق للجهد بين الجانبين m و n . وهذا الجهد المستعرض هو ما يعرف **بجهد هول** ، V_H . وتتحدد قيمته بالتوازن القائم بين القوى المغناطيسية والقوى الكهربى المؤثرة على ناقلات الشحنة :

$$qE_H = q\left(\frac{V_H}{d}\right) = qvB$$

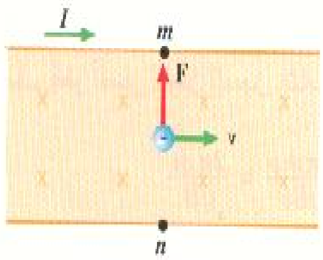
وهو ما يؤدى إلى :

$$V_H = vBd$$

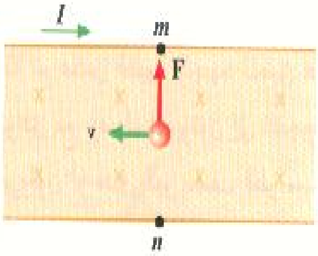
حيث v هى سرعة انسياق الشحنات و d هو عرض الشريط فإذا كانت قيم B ، d ، V_H معروفة من القياسات فإن v يمكن تعيينها .



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل 18-19:
أثر هول . هل تستطيع إثبات أن الجهد بين m و n تنعكس إشارته إذا كانت الشحنات سالبة بدلاً من موجبة ؟ (تذكر أن قاعدة اليد اليمنى تحدد القوة المغناطيسية المؤثرة على شحنة موجبة . أما القوة المؤثرة على شحنة سالبة فتكون فى الاتجاه المضاد) .

10-19 القوى بين تيارين متوازيين ، الأمبير

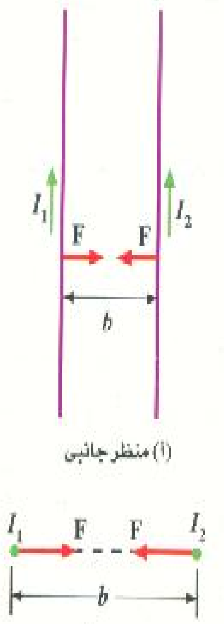
سنقوم الآن بمراجعة سريعة للمبادئ الأساسية للمغناطيسية ؛ وهو ما درسناه حتى الآن . لقد حددنا اتجاه المجال المغناطيسى بدلالة سلوك البوصلة . وعرفنا أيضًا أن سلكًا حاملاً للتيار يتعرض لقوة مغناطيسية إذا وضع فى مجال مغناطيسى . وبالإضافة إلى ذلك ؛ عرفنا أن التيار يعتبر مصدرًا للمجال المغناطيسى ، نظرًا لتأثير البوصلة عند وضعها بالقرب من تيار كهربى .

من المنطقى إذن ، أنه عند وجود تيارين متجاورين فإن كلاً منهما ينشئ مجالاً مغناطيسيًا يؤثر بقوة على الآخر . وقد أثبتت تجارب أروستيد وعالم الفيزياء والرياضيات

الفرنسي أندريه ماري أمبير في بداية القرن الثامن عشر صحة هذا الأمر . وسنستخدم هذه الحقيقة الخاصة بالتفاعل الأساسي بين التيارات لكي نُعرِّف وحد التيار (الأمبير) .

سنفترض أن لدينا سلكين طويلين مستقيمين يحملان تيارين I_1 ، I_2 متوازيين كما يوضح الشكل 19-19 . وتفصل بين السلكين مسافة مقدارها b . لقد ثبت أن هناك قوة تجاذب يؤثر بها كل من التيارين على الآخر . ومقدار هذه القوة منسوبًا إلى وحدة الأطوال يتناسب مع حاصل ضرب التيارين طرديًا ومع المسافة b بينهما عكسيًا :

$$\frac{F}{L} = \frac{kI_1I_2}{b} \qquad (19\text{–}6)$$



شكل 19-19:
يتجاذب التياران المتوازيان . في (ب) تمثل النقط الخضراء التيار خارجًا نحو القارئ . ما الذى يحدث لو أن التيارين متوازيان ومتضادان ؟

حيث k ثابت التناسب .

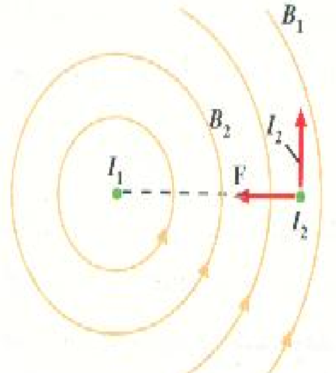
وإذا طبقنا قاعدة اليد اليمنى على الشكل 19-20 فسنرى أن القوة المؤثرة على I_2 تتجه نحو I_1 (أى أنها قوة تجاذب) ؛ فالمجال الناشئ عن I_1 يتجه إلى داخل الصفحة عند موقع I_2 . فإذا كان إبهام اليد اليمنى يشير إلى اعلى نحو قمة الصفحة ، وتتجه أصابع اليد اليمنى إلى داخل الصفحة فإن راحة اليد ستقوم بالدفع ناحية I_1 . وحسب نص قانون نيوتن الثالث فإن التيار I_2 لابد أن يؤثر بقوة مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه على التيار I_1 ـ ويمكن إثبات ذلك بنفس الطريقة السابقة إذا حددنا المجال المغناطيسى للتيار I_2 عند موقع I_1 ثم تطبيق قاعدة اليد اليمنى هناك .

وفى الحالة الخاصة لتيارين متساويين $I_1 = I_2 = I$ فإننا نستطيع أن نصل إلى تعريف لوحدة التيار ، ومن ثم تعيين قيمة ثابت التناسب k :

عندما يوضع تياران متساويان ومتوازيان وشدة كل منهما أمبير واحد (A) فإن كلاً منهما يؤثر على الآخر بقوة مقدارها 2×10^{-7} N لكل متر من طولهما إذا كانت المسافة بينهما مقدارها متر واحد .

وقد يبدو هذا التعريف اختياريًا وهو بالفعل كذلك . وكما درسنا فى الفصل الأول فإن بعض الكميات التى نقيسها فى الفيزياء تعتبر أساسية لجميع الكميات الأخرى ولابد من تعريف وحداتها بطريقة اختيارية . ووحدة الأمبير من تلك الوحدات . (ومن الوحدات الأخرى التى اتفقنا بها الكتلة والطول والزمن ودرجة الحرارة) .

على الرغم من أننا تعرفنا على وحدة الكولوم للشحنة من قبل أن نبدأ دراستنا للتيار الكهربى ، إلا إننا سنستعمل تعريف الأمبير الذى وصلنا إليه منذ قليل فى تعريف الكولوم .



شكل 19-20:
يخلق التيار I_1 مجالاً مغناطيسيًا B_1 يؤثر بقوة F على I_2 . هل يمكنك إثبات أن المجال B_2 الناشئ عن I_2 يؤثر بقوة مساوية ومضادة على I_1 ؟ (هذا مثال آخر على قانون نيوتن الثالث) .

كولوم واحد يساوى حاصل ضرب 1 أمبير × 1 ثانية (1 C = 1 A.s) .

سنتعرف الآن على ما يقدمه هذا التعريف فيما يتعلق بقيمة ثابت التناسب فى المعادلة 19-6 ، التى تعطينا عند حلها للحصول على k :

$$k = \frac{Fb}{I_1I_2L}$$

ومنها يتضح أن وحدات SI للمقدار k هى

$$\frac{N.m}{A^2.m} = \frac{N}{A^2}$$

وباستخدام هذه الوحدات والتعريف السابق للأمبير لابد أن يكون لدينا :

$$k = \frac{(2\times10^{-7})(1m)}{(1A)(1A)(1m)} = 2\times10^{-7}\ N/A^2 \qquad (19\text{–}7)$$

وعلى الرغم مما قد يبدو غريبًا وأخرقًا ، إلا أن الثابت k يكتب عادة على هيئــة $\mu_0/2\pi$ ، حيث المقدار μ_0 هو ثابت فيزيائى كونى آخر يسمى **إنفاذية الفراغ** وقيمــة هـذا الثـابت μ_0 طبقًا لـهذا التعريف هى :

$$\mu_0 = 4\,\pi\times10^{-7}\ N/A^2$$

وتصبح المعادلة 6–19 مع استعمال هذا الرمز الجديد

$$\frac{F(2\ \text{على}\ 1)}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b} \qquad (19\text{–}8)$$

وفى النهاية ، ماذا يحدث لو أننا عكسنا اتجاه أحد التيارين ليصبحا متوازيين ومتضادين ؟ لابد أنه لن يكون مستغربًا أن القوى المؤثرة على كلٍ من التيارين ستنعكس هى الأخرى فتصبح متنافرة .

مثال 2-19 :

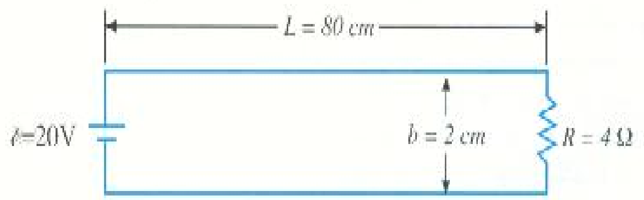
فى الشكـل 21–19 ، تتصل بطارية قوتها 20 V بجهاز كهربائى بواسطة سلكين متوازيين طولهما 80 cm ويفصل بينهما مسافة مقدارها 2 cm . وللجهاز مقاومة مقدارها 4 Ω بينما مقاومة جميع أسلاك التوصيل مهملة بالمقاومة بـهذا . احسب القوة المغناطيسية التى يوثر بها كل من السلكين على الآخر . وهل هذه القوة تجاذبية أم تنافرية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : على أى شيء تعتمد القوة المغناطيسية ؟

الإجابة : تدلنا المعادلة 6–19 على أن القوة لوحدة الأطوال تتناسب طرديًا مـع حاصل ضرب التيارين المارين فى السلك وعكسيًا مع المسافة بينهما .

سؤال : ما الذى يحدد ما إذا كانت القوة تجاذبية أو تنافرية ؟



شكل 21–19:
احسب القوة المؤثرة بين السلكين الطويلين فى الدائرة .

الإجابة : إنها تجاذبية إذا كان التياران فى نفس الاتجاه وتنافرية لو كانا متعاكسين .

سؤال : وإلى أى الحالتين تنتمى هذه المسألة ؟

الإجابة : تدور الشحنة فى دائرة كهربية مغلقة ولهذا يكون التيار المار فى السلكين هو نفس التيار من حيث المقدار ومتعاكس الاتجاه .

سؤال : ما الذى يحدد مقدار التيار ؟

الإجابة : إنه قانون أوم : $I = V/R$ ، حيث $V = 20\ \text{V}$ و $R = 4\ \Omega$.

سؤال : ما هى المعادلة الرياضية الدقيقة لحساب القوة ؟

الإجابة : تدل المعادلة 8-19 على أن $F = \dfrac{\mu_0 I^2 L}{2\pi b}$. وقيمتا L و b معلومتان .

الحل والمناقشة : أولاً لابد من ملاحظة أن القوتين المؤثرتين على السلكين متنافرتان ، أما التيار فهو

$$I = V/R = 20\ \text{V}/4 = 5\ \text{A}$$

والقوة المؤثرة على كل من السلكين هى

$$F = \frac{(2\times10^{-7}\ \text{N/A}^2)(5\ \text{A})^2(0.80\ \text{m})}{0.02\ \text{m}} = 2.00\times10^{-4}\ \text{N}$$

إن الثابت μ_0 صغير جدًا ولهذا فإن القوة المغناطيسية بين التيارين تكون صغيرة جدًا ما لم يكن التياران كبيرين للغاية ، أو أن المسافة بينهما صغيرة جدًا .

19-11 المجالات المغناطيسية الناتجة عن تيارات كهربية

لم نفعل إلى الآن سوى النص دون برهان ـ على أن التيارات الكهربية تخلق مجالات مغناطيسية ، وفحصنا حالة واحدة كان فيها تياران يؤثران بقوة على بعضهما البعض . وعلينا الآن أن نحدد بدقة تلك المجالات المغناطيسية التى تخلقها تشكيلات مختلفة من التيارات . وستكون نتائج القسم السابق هى البداية ، لإيجاد المجال المغناطيسى الناشئ عن تيار يمر فى سلك مستقيم طويل .

وقد أصبحنا نعرف من سلوك إبرة البوصلة أن المجال المغناطيسى الذى يخلقه تيار يمر فى سلك مستقيم يكون على شكل حلقات متحدة المركز حول السلك (الأشكال 5-19 و 6-19) . وعلى هذا يكون المجال B_1 نتيجة التيار I_1 المبين فى الشكل 19-19 هو الذى توضحه الدوائر فى الشكل 20-19 .

ونستطيع أيضًا أن نستعمل المعادلة 1-19 لكى نكتب معادلة القوة التى يؤثر بها B_1 على I_1 بالنسبة للموقف المبين فى الشكل 20-19 .

$$F(\text{المؤثرة على } I_2) = (B_1)_\perp I_1 L$$

حيث $(B_1)_\perp$ هى مركبة المجال المغناطيسى العمودية على I_2 **فى موقع** I_2 . ويلاحظ فى

الشكل 20-19 أن B_2 متعامد مع I_2 ولهذا يكون $(B_1)_\perp = B_1$.

دعنا الآن نستخدم النتائج التجريبية للقسم السابق :

$$F(I_2 \text{ المؤثرة على}) = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi b}$$

وبمقارنة هذين التعبيرين فإننا نحصل مباشرة على صيغة لشدة المجال المغناطيسي الناشئ عن سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا I :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \qquad \text{(السلك طويل مستقيم يحمل تيارًا)} \qquad (19\text{–}9)$$



شكل 22-19:
المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار مستقيم طويل .

يلاحظ هنا أننا أسقطنا الأرقام السفلية على كل من B_1 و I_1 وعممنا مسافة التباعد b لتصبح أية مسافة r من التيار I . والمجال المغناطيسي الدائري لتيار طويل مستقيم مبين بالشكل 22-19 . ويلاحظ أن خطوط المجال تصبح أكثر تباعدًا كلما زادت المسافة بعيدًا عن I مما يشير إلى أن B يتناقص مع زيادة r (المعادلة 9-19) .

وحساب المجالات المغناطيسية التي تخلقها تشكيلات أخرى للتيارات ، أكثر تعقيدًا عن الذي أوردنا منذ قليل ، ويتطلب معرفة بطرق التفاضل والتكامل . وقد تمكن أمبير من ابتكار أسلوب رياضي لمعالجة الحالة العامة للعلاقة بين أية تيارات والمجالات التي تخلقها تلك التيارات . ويعرف هذا الأسلوب **بقانون أمبير** . على أن هذا القانون يقع خارج نطاق المستوى الرياضي لهذا الكتاب ولذا نورد ـ ببساطة ـ النتائج بالنسبة لعدد قليل من الحالات البسيطة والمفيدة .

حلقة دائرية من السلك

سنفترض أن لدينا حلقة دائرية من السلك ، تحمل تيارًا I كما يوضح الشكل 23-19 (أ) ويوضح خطوط المجال بتفصيل أكبر في الجزء (ب) من الشكل . فإذا كان نصف قطر الحلقة a ، يكون مقدار المجال عند مركز الحلقة هو

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a} \qquad (19\text{–}10)$$

وعليك تذكر أن هذه المعادلة لا تنطبق إلا على نقطة وحيدة عند مركز الحلقة . أما الملف الذى يحتوى على عدد N حلقة متراصة بإحكام إلى بعضها البعض في مستوى ، فإنه ينتج عند مركزه مجالاً أكبر من المذكور في (10-19) N مرة .

الملفات اللولبية

يمكننا عمل ملف لولبي لو أننا قمنا بلف السلك على شكل حلزوني ليصبح كالياى والملف الموضح في الشكل 4-19 ، ذو لفات متباعدة ومفككة أكثر من المعتاد . ففي العادة يتم لف الملف اللولبي بحيث تتلامس اللفات المتجاورة . وعند مقارنة ما جاء في

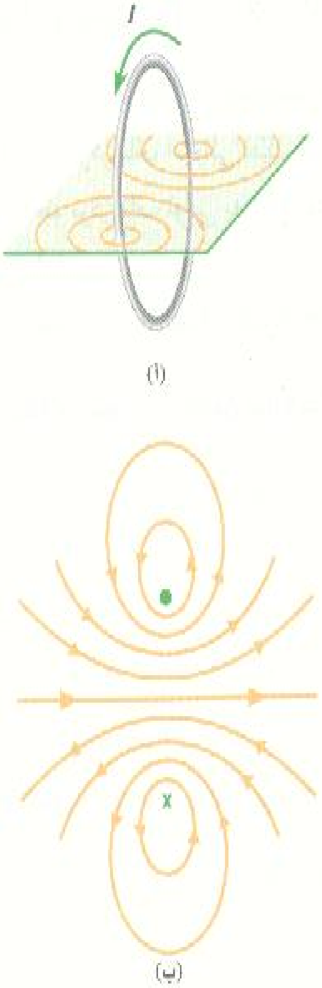
الشكل 24–19 بالمجال الناشئ عن حلقة منفردة في الشكل 23–19 (ب) فإننا نكتشف أن مجالات اللفات المتجاورة تجمع كلها معًا لتكوّن المجال النهائي . ويبين الجزء (ب) من الشكل مقطعًا مستعرضًا في جزء من ملف لولبي محكم اللف . وكما يدل الشكل فإن المجال المغناطيسي بداخل الملف يكون منتظمًا تقريبًا . وهكذا فإن مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي مجوف ويحمل تيارًا I ، ويتكون من n حلقة من السلك في كل متر من طوله هو :

$$B = \mu_0 n I \tag{19-11}$$

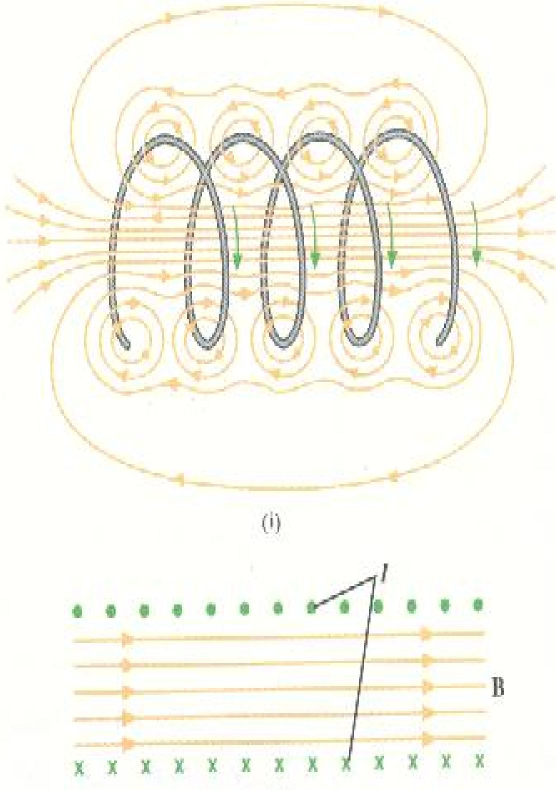
وتنطبق هذه العلاقة داخل الملف بأكمله فيما عدا بالقرب من طرفيه . ويستعمل الملف اللولبي دائمًا لخلق مجال مغناطيسي يكون منتظمًا تقريبًا . ويلاحظ أن مقدار B لا يعتمد على قطر أو طول الملف اللولبي . وعلينا ـ دائمًا ـ تذكر أن n هو عدد اللفات في كل متر من طول الملف . فإذا كان N هو العدد الكلي للفات و L هو طول الملف اللولبي فإن $n = N/L$ ويمكن عندئذ كتابة المعادلة 11–19 بالصورة البديلة التالية :

$$B = \frac{\mu_0 N I}{L}$$

وتستخدم الملفات اللولبية الملفوفة على قلوب من حديد في المغناطيسات الكهربائية لأجراس الأبواب والعديد من الأجهزة الأخرى .



شكل 23–19:
منظران للمجال المغناطيسي المتكون حول حلقة تحمل تيارًا . (أ) رسم منظور . (ب) مقطع مستعرض للحلقة الموضحة في الجزء (أ) وبها خطوط المجال .



شكل 24–19:
(أ) رسم منظور لملف لولبي ملفوف بدون إحكام . (ب) منظر لمقطع مستعرض في ملف به عدد كبير من حلقات السلك . وبعيدًا عن طرفي الملف اللولبي فإن المجال يكون منتظمًا بالضرورة بداخله .

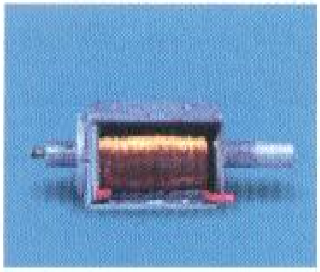
مثال توضيحى 3-19

قارن بين شدة المجالات المغناطيسية فى الحالات الثلاث التالية :

1 عند مركز ملف استوائى نصف قطره $r = 2$ cm وبه 100 لفة . وكان التيار المار 5 A .

2 عند مركز ملف لولبى به 100 لفة ونصف قطره $r = 2$ cm وطوله $L = 5$ cm والتيار 5 A .

3 عند نقطة تبعد مسافة مقدارها 2 cm من سلك مستقيم طويل . التيار هو 500 A .



عندما يتدفق تيار خلال لفات هذا الملف اللولبى ، فإن المجال المغناطيسى الناشئ يجذب القلب المصنوع من الصلب إلى داخل الملف اللولبى . وتستخدم هذه الملفات اللولبية على نطاق واسع فى نبيطات الفتح والإغلاق .

استدلال منطقى : ستكون معادلات الحالات الثلاث على النحو التالى :

1 $$B = \frac{N\mu_0 I}{2r}$$ حيث $N = 100$

2 $$B = \frac{\mu_0 N I}{L}$$ تقريبا

3 $$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

وبالتعويض عن المقادير التى بهذه المعادلات فإن :

1 $$B = \frac{(100)(4\pi\times10^{-7}\ \text{T.m/A})(5\ \text{A})}{2(0.02\ \text{m})} = 1.57\times10^{-2}\ \text{T}$$

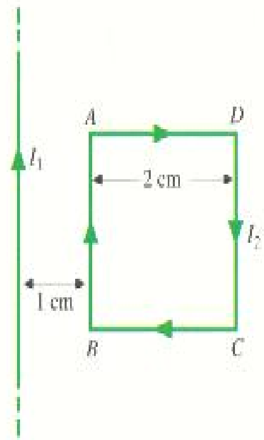
2 $$B = \frac{(100)(4\pi\times10^{-7}\ \text{T.m/A})(5\ \text{A})}{0.05\ \text{m}} = 1.26\times10^{-2}\ \text{T}$$

3 $$B = \frac{(4\pi\times10^{-7}\ \text{T.m/A})(500\ \text{A})}{2\pi(0.02)} = 5.0\times10^{-3}\ \text{T}$$

إن استخدام ملفات عديدة اللفات ، وسيلة لمضاعفة الأثر الناشئ عن تيار صغير من حيث خلق مجالات مغناطيسية . ويشير هذا المثال التوضيحى أيضًا إلى الفروق الناتجة عن اختلاف هندسة التيارات وما تحدثه فى قيمة B .

مثال 3 - 19 :

يوضح الشكل 25-19 سلكًا طويلاً جدًا ومستقيمًا ، يحمل تيارًا $I = 50$ A إلى أعلى . كما أن هناك ملفًا على هيئة مربع طول ضلعه 2 cm وقد وضع بحيث يكون ضلعاه AB و CD موازيين للسلك الطويل وبحيث يبعد الضلع AB عنه مسافة 1 cm . ويحمل الملف تيارًا $I_2 = 30$ A يتدفق فى اتجاه حركة عقارب الساعة كما هو مبين . عين اتجاهات القوة المغناطيسية المؤثرة على كل ضلع من أضلاع الملف وكذلك القوة الصافية التى يؤثر بها السلك المستقيم على الملف .



شكل 25-19:
أوجد القوة الصافية المؤثرة على العروة المربعة .

1

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يحدد اتجاه القوة المؤثرة على الضلعين AB و CD ؟

الإجابة : التيار I_2 فى الضلع AB يوازى التيار I_1 وتكون القوة بين التيارين المتوازيين تجاذبية . أى أن الضلع AB سينجذب نحو السلك الطويل . أما التيار فى الضلع CD فهو يوازى ويضاد التيار I_1 ولذا فالقوة المؤثرة على CD ستتجه بعيداً عن السلك .

سؤال : كيف أستطيع أن أحدد اتجاه القوى المؤثرة على الضلعين CB AD فى هاتين الحالتين يتعامد التيار I_1 مع I_2 .

الإجابة : تكون القوة المؤثرة على المربع ناتجة عن تفاعل التيار I_2 مع المجال الذى يخلقه I_1 . فإذا وجهت إبهامك الأيمن فى اتجاه I_1 ، فلابد أن تشير الأصابع إلى أن B_1 متجه إلى داخل الصفحة فى منطقة الملف .

سؤال : وماذا ينشأ عند تطبيق قاعدة اليد اليمنى على الضلعين AD و BC عندما استخدم هذا الاتجاه للمجال B_1 ؟

الإجابة : عند وضع الإبهام الأيمن فى اتجاه I_2 محازيًا الضلع AD ، بينما تشير الأصابع باتجاه B_1 فلابد أن نستنتج أن القوة (فى الاتجاه الذى تقوم راحة اليد فيه بالدفع) ستشير إلى أعلى . وبنفس القاعدة تستطيع إثبات أن القوة المؤثرة على CB ستتجه إلى أسفل .

سؤال : وهل تكون هنا محصلة لمركبة القوة إلى أعلى أو إلى أسفل ؟

الإجابة : اتجاها القوتين المؤثرتين على AD و BC متعاكسان . فإذا اخترت قطعة صغيرة من كل من هذين الضلعين وتقع على نفس المسافة من السلك ، فإن القوتين المؤثرتين على القطعتين تلغى كل منهما الأخرى . وبنفس الطريقة يمكنك إثبات أن مقابل كل نقطة على الضلع AD تتعرض لقوة متجهة إلى أعلى ، ستكون هناك نقطة مناظرة على الضلع BC تتعرض لقوة مساوية متجهة إلى أسفل وهكذا فإن القوى الكلية المؤثرة على هذين الضلعين تتلاشى .

سؤال : ولماذا تكون هناك قوة صافية تؤثر على الملف ؟

الإجابة : إن المجال المغناطيسى يكون أقوى بالقرب من السلك ولهذا فإن القوة المؤثرة على AB ستكون أكبر من تلك المؤثرة على CD ، على الرغم من أن التيار I_2 المار خلال AB و CD هو نفس التيار .

سؤال : ما هو التعبير المحدد للقوى المؤثرة على AB و CD ؟

الإجابة : يعطى مقدار القوة بين التيارين المتوازيين أو المتوازيين ومتضادين بالمعادلة 19-8 :

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

حيث $d = 1\ \text{cm}$ بالنسبة للضلع AB و $d = 3\ \text{cm}$ بالنسبة للضلع CD .

الحل والمناقشة : القوى المؤثرة على وحدة الأطوال من AB و CD هى :

$$\frac{F_{AB}}{L}=\frac{(4\pi\times10^{-7}\ \text{T.m/A})(20\ \text{A})(30\ \text{A})}{2\pi(0.01\ \text{m})}=0.030\ \text{N/m}\quad \text{(إلى اليسار)}$$

$$\frac{F_{CD}}{L}=\frac{(4\pi\times10^{-7}\ \text{T.m/A})(20\ \text{A})(30\ \text{A})}{2\pi(0.03\ \text{m})}=0.010\ \text{N/m}\quad \text{(إلى اليمين)}$$

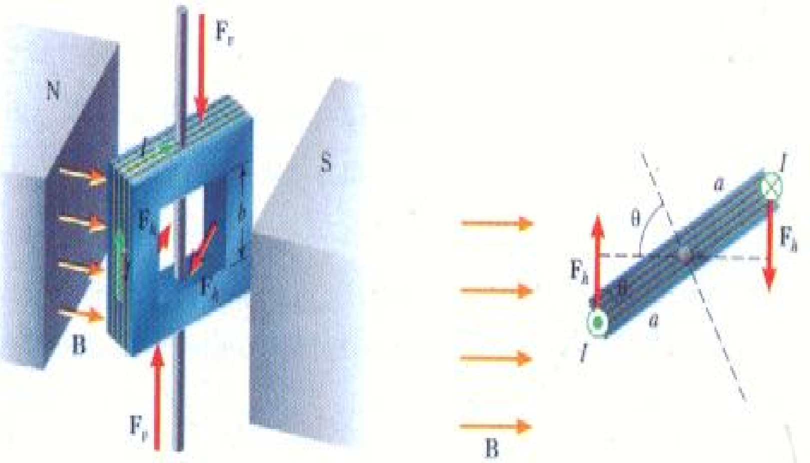
وتكون محصلة القوة المؤثرة على الملف هى

$$F_{net}=(0.030\ \text{N/m}-0.010\ \text{N/m})(0.02\ \text{m})=4\times10^{-4}\ \text{N}$$

وتكون فى اتجاه السلك . ويلاحظ أيضًا أن القوى المؤثرة علـى كـل أضـلاع الملـف تميـل على جعله يتمدد .

19-12 عزم الدوران المؤثر على عروة (حلقة) تيار

يستخدم فى كثير من الأجهزة العملية ، بما فيها المحركات وكثير مـن أجهزة القياس عزم الدوران الذى تعانيه عروة تيار عند وضعها فـى مجـال مغناطيسـى . وسنرجع إلى الشكل 26-19 (أ) لكى نتعرف على كيفية ظهور عزم الدوران هذا ، حيث يرى بالشكل ملف يحمل تيارًا فى مجال مغناطيسى . والملف مثبت على محور ويمكنه الدوران حولـه . وباستخدام قاعدة اليد اليمنى فإننا نحصل على القوى المؤثرة على مختلف الأضـلاع كمـا هو بالشكل . ويلاحظ أن قوتين فقط $\mathbf{F}_h$ هما اللتان تتسببان فـى خلـق عـزم دوران حـول المحور . وحتى هاتان القوتان لا يمكن أن ينتـج عنـهما عـزم دوران ، إذا كـان مسـتوى الملف عموديا على مجال المغناطيس ، لأنه عندئذ يكـون ذراعـا الرافعـة بالنسـبة لمحـور الدوران صفرًا لكل من القوتين . ويحدث أقصى عزم دوران عندما تـنزلق خطـوط المجـال المغناطيسى على سطح الملف ، أى عندما تقع خطوط المجال فى مسـتوى الملـف ، لأنـه عندئذ تكون ذراع الرافعة بالنسبة للقوة $\mathbf{F}_h$ عند أقصى قيمة لـها .



(أ) رسم منظور — (ب) منظر من أعلى

شكل 26-19:
يجعل المجال المغناطيسى الخارجى الملـف الحامل للتيار يتعرض لعزم دوران .

وسنقوم الآن بالحصول على تعبير كمى لعزم الدوران المؤثر على الملف ، مع ملاحظـة أن كلاً من القوتين $\mathbf{F}_h$ سيكون لـها عزم دوران هو :

(ذراع الرافعة) (F_h)

ويوضح الشكل 26-19 (ب) أن ذراع الرافعة (أو ذراع القوة) هو $a \sin \theta$ ومنه يتضح أن العزم الدوراني المؤثر على الملف هو

$$\text{عزم الدوران} = 2\, F_h\, a \sin \theta$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين B والعمود المقام على مساحة سطح الملف . ولكن F_h ليست سوى القوة المؤثرة على الضلع الرأسي للملف . فلو كان طول الضلع الرأسى هو b والتيار هو I ، فإن كل سلك رأسى سيسهم بقوة مقدارها BIb فى F_h . على أن الملف يحتوى على N حلقة (أو لفة) ولهذا فإن القوة $F_h = NBIb$ ويصبح عزم الدوران :

$$\text{عزم الدوران} = (2\,ab)\,(NI)\,(B \sin \theta)$$

مع ملاحظة أن $2\,ab$ ليست سوى مساحة الملف A . ونستطيع من ثم أن نكتب

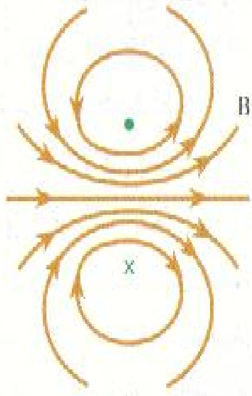
$$\text{عزم الدوران} = A\,(NI)\,(B \sin \theta) \qquad (19\text{-}12)$$

والمعادلة 12-19 صالحة للتطبيق لجميع الملفات المسطحة ، على الرغم من أننا قمنا باشتقاقها لملف له شكل خاص جدًا . وحيث أن NI هو التيار الذى يدور فى الملف ، فإن من أهم سمات الملف (إلى جانب اتجاهه) مساحته والتيار المار فيه . ومن المعتاد فى ضوء هذا أن نعرف كمية نطلق عليها **العزم المغناطيسى** لعروة التيار :

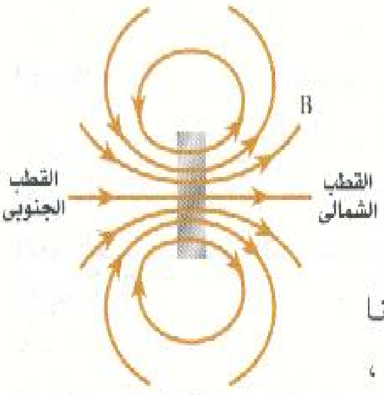
$$\mu = \text{العزم المغناطيسى} = AI_{tot} = A(NI) \qquad (19\text{-}13)$$

ويلاحظ أن وحدات العزم المغناطيسى هى $A.m^2$. من المهم هنا التنبيه إلى عدم الخلط بين رمز الانفاذية μ_0 والعزم المغناطيسى μ ، فعلى الرغم من استعمالنا لنفس الحرف الإغريقى إلا أن الرمزين يمثلان كميتين مختلفتين تمامًا .

وهناك فائدة محددة من اعتبار عروة التيار كما لو كانت قضيبًا مغناطيسيًا يتميز بعزمه المغناطيسى ، كما سنرى بعد قليل .



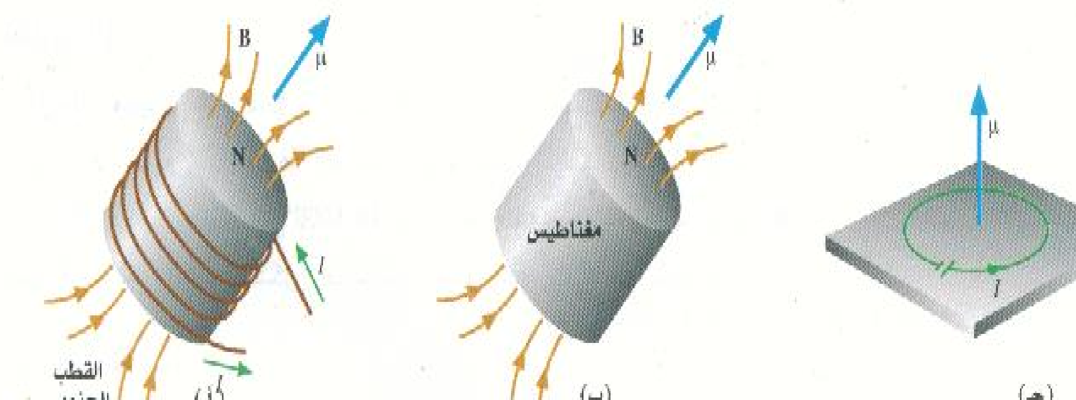
(أ)



(ب)

شكل 27-19:
يلاحظ هنا كيف أن حلقة التيار تعمل كقضيب مغناطيسى قصير ، ويتم تمثيل اتجاه التيار بالرمزين • و × فى الجزء (أ) .

شكل 28-19:
يعمل الملف المرسوم فى الجزء (أ) كالقضيب المغناطيسى المبين فى (ب) . لاحظ كيفية تحديد العزم المغناطيسى μ فى (جـ)



(أ) (ب) (جـ)

إذا قارنا نمط المجال الذى ينشأ إما عن عروة تيار (الشكل 27-19 أ) أو عن ملف لولبى (الشكل 28-19 أ) مع الذى ينشأ عن قضيب مغناطيسى فسنجد أن المجالات متماثلة جدًا . ويلاحظ أن كلا من العروة والملف يعملان كقضيب مغناطيسى قصير . وعلاوة على ذلك فإن الملف والعروة إذا وضعا فى مجال مغناطيسى فإنهما سيتعرضان لعزم دوران فى نفس اتجاه عزم الدوران المؤثر على قضيب مغناطيسى . فعلى سبيل المثال ، لو كان يتجه من اليسار إلى اليمين كما فى الشكل 27-19 و 28-19 فإن النبيطات الثلاث أجمعها ستتعرض لعزم دوران فى اتجاه حركة عقارب الساعة .

ويمكننا الحصول على أقصى فائدة من مفهوم العزم المغناطيسى إذا حددنا اتجاهه . ويوضح الشكل 28-19 الاتجاه المميز للعزم μ ، حيث يلاحظ أن μ متجه على امتداد محور المغناطيس ، أو العروة أو الملف بطريقة تجعله يتبع اتجاه الخط المركزى للمجال الذى يخترق الملف . وهناك طريقة مفيدة لوصف اتجاه μ وهى تتضمن قاعدة أخرى لليد اليمنى : إذا ضممت أصابع يدك اليمنى لتتخذ اتجاه دوران التيار فى الملف فإن إبهامك اليمنى سوف تشير باتجاه μ . ونتيجة لهذا فإن متجه العزم المغناطيسى μ سيشير إلى الاتجاه الخارج من القطب الشمالى للمغناطيس المكافئ للملف . ويؤدى هذا إلى النتيجة المهمة التالية :

تدور عروة (حلقة) تيار موضوعة فى مجال مغناطيسى بحيث يصطف متجه عزمها المغناطيسى موازيًا لمتجه المجال المغناطيسى . ويكون عزم الدوران المؤثر على العروة هو

$$\text{العزم} = \mu B \sin\theta$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين μ و $\mathbf{B}$.

ويمكنك تقدير صحة هذا إذا تذكرت أن أبرة البوصلة ليست سوى قضيب مغناطيسى صغير وأن اتجاه المجال يتحدد بأنه الاتجاه التى تصطف فيه الإبرة . وسوف نجد من المناسب - من حين لآخر - أن ننظر إلى عروة التيار على أنها مغناطيس ذو عزم مغناطيسى مقداره μ .

مثال 4 - 19 :

أدخل ملف صغير ذو عشر لفات ، ونصف قطره 5 cm داخل ملف لولبى بحيث كان مستوى الملف يصنع زاوية مقدارها 45° بالنسبة لمحور الملف اللولبى (الشكل 29-19) . وكان الملف اللولبى يحتوى على 1000 لفة فى المتر من طوله ويحمل تيارًا مقداره 25 A يتدفق فى الاتجاه الموضح بالشكل . ما هو عزم الدوران الذى يتعرض له الملف الصغير ؟

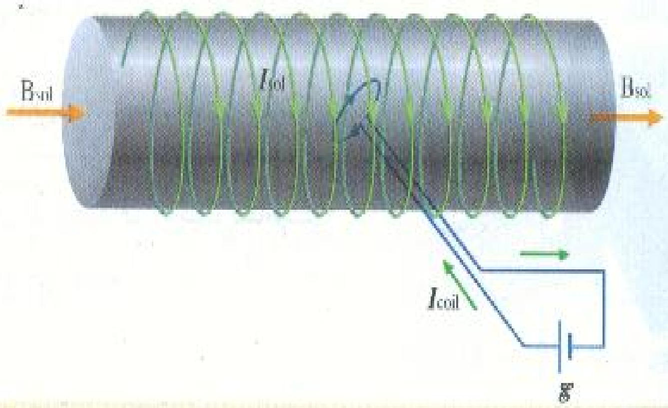
استدلال منطقى :

سؤال : على أى المقادير يعتمد عزم الدوران ؟

الإجابة : يعتمد على العزم المغناطيسى للملف وعلى المجال المغناطيسى الذى يوضع

فيه وعلى الزاوية بين μ و **B** . وبشكل محدد ، فإن :

$$\tau = \mu B \sin\theta$$



شكل 29-19:
أوجد عزم الدوران المؤثر على الملف الصغير .

سؤال : ما هو تعريف العزم المغناطيسى ؟

الإجابة : $\mu = AI_{tot} = A(NI)$ والمساحة $A = \pi r^2$ ، حيث r هو نصف قطر الملف .

سؤال : ما هو اتجاه μ ؟

الإجابة : إذا كانت أصابع اليد اليمنى وهى منقبضة تدل على اتجاه التيار بالملف فإن الإبهام اليمنى تشير فى اتجاه μ ، وهو متعامد مع مستوى الملف .

سؤال : ما هى المعادلة الدالة على المجال المغناطيسى الخاص بالملف اللولبى ؟

الإجابة : $B = \mu_0 nI$ ، حيث n هى عدد اللفات فى وحدة الأطوال من الملف اللولبى .

سؤال : ما هو اتجاه مجال الملف اللولبى ؟

الإجابة : يمكن تحديده بنفس الطريقة التى يتحدد بها العزم المغناطيسى للملف الصغير .

سؤال : ما هو الاتجاه الذى يؤثر فيه عزم الدوران ؟

الإجابة : سيميل العزم إلى إدارة الملف بحيث يكون μ فى اتجاه **B** .

الحل والمناقشة : إن يدك اليمنى ستدلك على أن اتجاه μ يقع عند زاوية مقدارها 45° أسفل الخط الأفقى إلى اليمين فى الشكل 29-19 . وبالمثل فإن اتجاه **B** فى الملف اللولبى سيكون أفقيًا إلى اليمين .

والعزم المغناطيسى للملف الصغير هو :

$$\mu = (10\text{ turns})(0.060\text{ A})\,\pi(0.05\text{ m})^2 = 4.7\times10^{-3}\text{ A.m}^2$$

والمجال المغناطيسى داخل الملف اللولبى هو

$$B = (4\pi\times10^{-7}\text{ T.m/A})(1000\text{ turns/m})(25\text{ A}) = 3.14\times10^{-2}\text{ T}$$

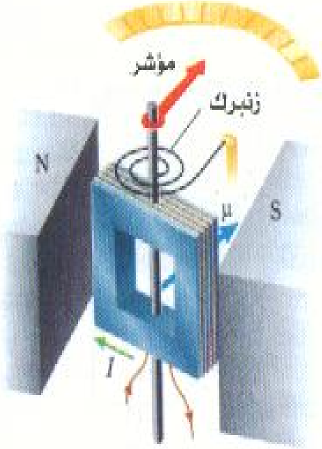
ومن ثم يكون العزم المؤثر على الملف هو

$$\tau = (4.7\times10^{-3}\text{ A.m}^2)(3.14\times10^{-2}\text{ T})\sin 45^\circ$$

$$= 1.04\times10^{-4}\text{ m.N}$$

وقد لا يكون واضحًا على الفور أن هذه الوحدات ناتجة من الحسابات . وعليك التأكد من قدرتك على إثبات أنه كذلك . وتستطيع اعتبار الملف بمثابة إبرة بوصلة

عزمها μ فى اتجاه القطب الشمالى . وسيعمل العزم الدورانى إلى إدارة الملف فى اتجاه عكس حركة عقارب الساعة حول محور متعامد مع محور الملف اللولبى بنفس الطريقة التى تميل الإبرة المغناطيسية إلى الاصطفاف بها فى اتجاه **B** .

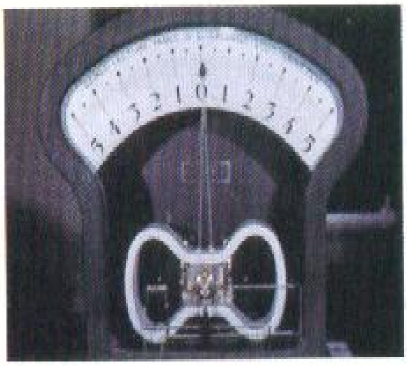


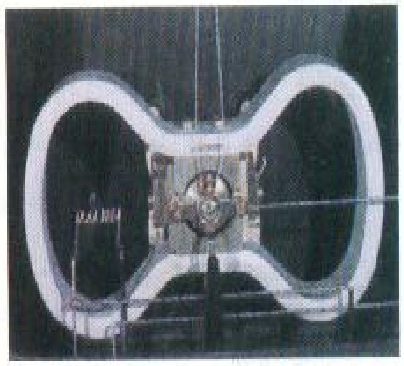
شكل 30-19:
التيار المار فى ملف الجلفانومتر يجعله يدور فى المجال المغناطيسى للمغناطيس الدائم .

19-13 الجلفانومترات والأميترات والفولتميترات ذات الملف المتحرك

لقد رأينا أن الملف الحامل للتيار يتعرض لعزم دوران إذا وجد فى مجال مغناطيسى . وحيث أن العزم الدورانى يتناسب مع التيار المار فى الملف فإن هذا التأثير يمكن استعماله لقياس التيار .

وحتى نتعرف على كيفية الاستفادة من هذا التأثير ، سنشير إلى الشكل 30-19 حيث يرى ملف حامل للتيار ، موضوع بين قطبى مغناطيس وعندما يكون التيار فى الاتجاه المبين ، فإن الملف يسلك سلوك مغناطيس ، قطبه الشمالى فى الناحية الخلفية (اختبر صحة هذه المقولة) . وسنشير إلى هذه الحقيقة بمتجه عزم مغناطيسى μ .





(أ) يوضح جلفانومتر ذا ملف متحرك وبداخله المغناطيس الدائم والملف المتحرك والمؤشر المتصل به .
(ب) صورة مقربة لمحور الملف داخل المغناطيس الذى يحيط به . وإذا مر تيار ضئيل فإنه يؤدى إلى انحراف تسهل قراءته للمؤشر .

وحيث أن متجه العزم المغناطيسى يحاول أن يكون بحذاء المجال ، فإنه الملف يدور بحيث يجعل هذا المتجه مصوبًا نحو القطب الجنوبى للمغناطيس الدائم . ولكن هذا الدوران يتوقف عند حد معين نظرًا لوجود زنبرك مثبت بالملف ليزوده بعزم دورانى مضاد . أى أن الملف سيدور مقدارًا يتناسب مع شدة التيار المار به . وعلى هذا يكون مقدار هذا الدوران الذى سيشير إليه مؤشر مثبت بالملف ، مقياسًا للتيار المار فى الملف .

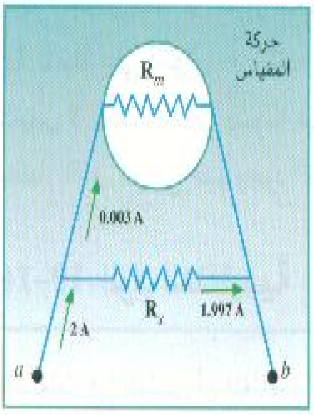
الجلفانومترات

عادة ما نطلق على الجهاز المرسوم تخطيطيًا فى الشكل 30-19 **حركة مقياس** ويزود الملف عمليًا بقلب من الحديد لتقوية المجال والعزم الدورانى . وكثير من أجهزة القياس بالغة الحساسية ، والمسماة جلفانومترات ، هى ببساطة حركة كهذه موضوعة فى غلاف مناسب . ولهذا يشيع استعمال المصطلحين **حركة مقياس وجلفانومتر** ليؤديا نفس المعنى .

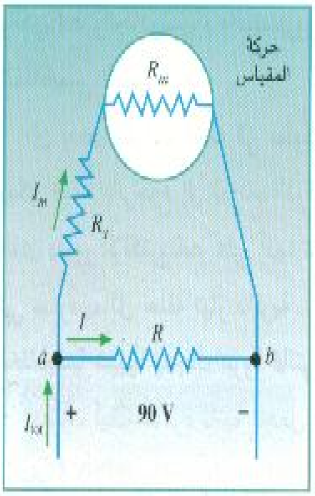
وتعتمد حساسية حركة المقياس - بمعنى مدى الانحراف الحادث عند مرور مقدار معين من التيار - على عدة عوامل . ومن الطبيعى أن تكون صلابة زنبرك الاسترجاع من أهم تلك العوامل . فالزنبرك - من ناحية - لابد أن تكون لديه استجابة معقولة لقياس

تيارات صغيرة ، ومن ناحية أخرى لا يجب أن يكون هشًا إذا كان على الجهاز أن يكون متينًا وقابلاً للحمل . كما تعتمد الحساسية على عدد لفات الملف ، فإذا تضاعف عدد اللفات فإن عزم الدوران يتضاعف تبعًا لذلك .

وينحرف الجهاز شديد الحساسية إلى أقصى مدى له ، إذا مر به تيار لا يزيد على كسر من الميكرو أمبير . ولابد لمثل هذا المقياس بالغ الحساسية أن يكون له عدد كبير من لفات السلك بالملف ، وهذا ما يجعل مقاومته تصل إلى $100\ \Omega$ بسهولة . وحتى مع هذا فإن جهدًا مقداره 10^{-4} V بين طرفيه سيجعل تيارًا 10^{-6} A يمر به . وتنحرف معظم جلفانومترات المنضدة عمومًا لأقصى مدى عند مرور تيار يبلغ $1\ mA (10^{-3}\ A)$ بها ، وتكون مقاومتها نحو $20\ \Omega$.



(أ)



(ب)

شكل 31-19:
(أ) لا يمر خلال حركة الأميتر سوى جزء صغير من التيار . أما معظم التيار فإنه يمر خلال المقاومة المتصلة على التوازي R_s . وبالنسبة لقيم التيار الموضحة فإن ، $R_s = R_m /666$. وهذا مثال على مدى صغر القيم النموذجية للمقاومة R_s .
(ب) وحتى يكون التيار المار خلال الفولتميتر صغيراً جدا فإن مقاومًا كبيرا جدا R_s يتصل على التوالى مع ملف الجهاز . وبالنسبة للرسم المبين فإن R_s تتخذ في الغالب المقدار $90.000\ \Omega$ أو أكثر .

الأميترات

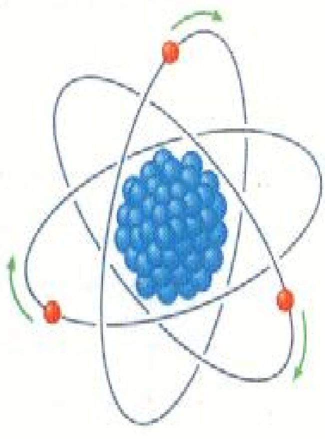
ولقياس التيار المار فى أحد فروع دائرة ما ، فإن أحد أجهزة القياس ذات الملف المتحرك يدمج فى ذلك الفرع . وفى هذه الحالة يسمى الجهاز **أميتر** . ولابد لكى يؤدى الجهاز وظيفته على الوجه الصحيح أن يحقق شرطين فمن المهم أولاً ألا يتسبب وجود الجهاز فى الدائرة فى أى تغير محسوس فى التيار المار فيها والمراد قياسه . أى أن مقاومة الجهاز لابد أن تكون أقل بكثير من مقاومة الفرع عندما لا يكون الجهاز متصلاً . وفضلاً عن ذلك فإن حركة الجلفانومتر الأساسية لابد أن تؤدى إلى أقصى انحراف عند مرور تيار نحو 1 mA خلاله . فإذا أريد للجهاز أن يقيس تيارات أكبر من هذا وليكن 1 A ، فإن معظم هذا التيار لابد أن يتفرع جانبًا ولا يسمح سوى لتيار صغير 1 mA أن يمر خلال ملف الجهاز ويتحقق هذان الهدفان إذا وصلت مقاومة صغيرة تسمى **مجزئ التيار** (تتصل دائمًا ليتفرع إليها التيار) على **التوازى** مع ملف الجهاز كما هو موضح فى الشكل 31-19 (أ) . ومقاومة المجزئ يتم اختبارها بحيث تكون أصغر بكثير من مقاومة الملف R_m . ويؤدى هذا إلى الأثر المطلوب ، وهو أن يتفرع معظم التيار ليمر خلال المجزئ . ومن ناحية أخرى فإن المقاومة المكافئة للمجموعة المتصلة على التوازى تكون أصغر من أى من المقاومتين بالمجموعة ـ وهكذا فالجهاز ذو المجزئ إذا وصل بفرع دائرة ما فإن ما يضيفه من مقاومة إلى الفرع يكون أقل من قيمة مقاومة المجزئ نفسه وبهذا لا يكون للتغيير الحادث فى الدائرة أثر يذكر .

الفولتميترات

ويمكن توصيل جهاز قياس ذى ملف متحرك على التوازى مع عنصر الدائرة R لقياس فرق الجهد عبره (الشكل 31-19 ب) ويسمى الجهاز فى هذه الحالة **فولتميتر** ويكون فرق الجهد عبر الجهاز هو نفسه الموجود عبر عنصر الدائرة . ومرة أخرى ، وحتى لا يسحب ملف الجهاز تيارًا أكبر من نحو 1 mA ، فإن معظم

التيار لابد من منعه من المرور خلال الملف . وهذا ما يتم عمله بإضافة مقاومة كبيرة R_s متصلة على التوالى مع الملف . وهذا من شأنه أيضًا أن يؤكد أن وجود جهاز القياس لا يحدث تغييرًا ملموسًا فى التيار المار فى الفرع المحتوى على R مقارنة بالتيار الذى يمر فى عدم وجود الجهاز .

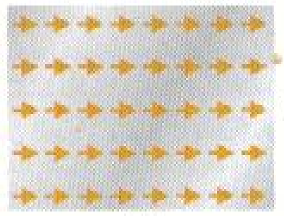
19-14 المواد المغناطيسية



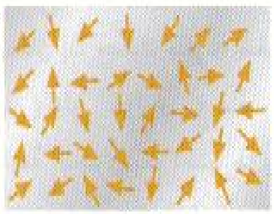
شكل 19-32:
تتصرف الإلكترونات التى تدور فى مدارات كحلقات التيار ، وتولد بذلك مجالات مغناطيسية .

لقد تعلمنا فى المدارس أن المغناطيسات تجذب الحديد ، بينما لا تجذب معظم المواد الأخرى . وقد وجد أن هناك عددًا قليلاً من المواد **الفيرومغناطيسية** (كالحديد والنيكل والكوبالت والجادولينيوم والديسبروزيوم وسبائكها) هى التى تتأثر تأثرًا بالغًا بالمجال المغناطيسى الثابت .

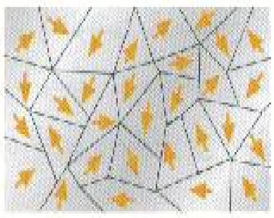
إن بعض الذرات تشبه فى سلوكها قضبان مغناطيسية صغيرة جدًا والسبب فى ذلك يمكن فهمه بالرجوع إلى نموذج الذرة الذى يستعمل دائمًا والمبين فى الشكل 19-32 الذى يصور الإلكترونات على أنها تدور حول النواة فى مدارات . وحيث أن الإلكترون فى مداره يماثل حلقة تيار دائرية ، فإن كل إلكترون فى الشكل 19-32 ولد مجالاً مغناطيسيًا شبيهًا بمجال عروة كالتى فى الشكل 19-23 .



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل 19-33:
(أ) قطعة حديد ممغنطة ، (ب) قطعة الحديد غير الممغنطة وغير المرتبة مرسومة تخطيطيًا ، (جـ) رسم أكثر واقعية للنطاقات المغناطيسية .

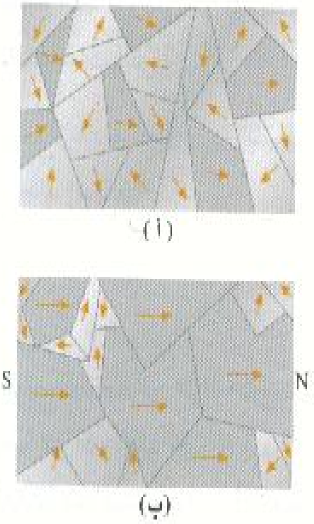
وهناك أيضًا ظاهرة ثانية تجعل الذرات تسلك مسلك المغناطيسات . أن الجسيمات الصغيرة كالإلكترونات والبروتونات تتصرف كما لو كانت تدور حول نفسها (مغزليًا) ، ولذا يقال أن لهذه الجسيمات **لف مغزلى** (أو درور) وأى شحنة تلف حول نفسها ، فهى فى الواقع تعمل كعروة تيار وتخلق بذلك مجالاً مغناطيسيًا .

والتأثيرات المغناطيسية للإلكترونات يلغى بعضها بعضًا فى كثير من الذرات . أما فى ذرات أخرى فإن الإلغاء يكون كاملاً تقريبًا ، ولكن ليس تمامًا . أما فى ذرات العناصر الانتقالية فحسب وهى العناصر الفيرومغناطيسية المذكورة ، منذ قليل ، فإن إسهامات ما يكفى من الإلكترونات تضاف إلى بعضها البعض لتضفى على كل ذرة عزمًا مغناطيسيًا كليًا ذا قيمة محسوسة . وهكذا تبدو هذه الذرات كأبر البوصلة الدقيقة للغاية . فإذا اصطفت أغلب هذه الذرات معًا داخل عينة ذات أبعاد معقولة من مادة فرومغناطيسية ، فإن العينة تصبح **ممغنطة** . وسنقوم بفحص هذه الحالة عن قرب أكثر .

نعلم جميعًا ، أننا لو وضعنا مجموعة من المغناطيسات الدقيقة بالقرب من بعضها البعض لأقصى ما يمكن ، فإنها تقوم بترتيب أنفسها بحيث يصبح كل قطب جنوبى قريبًا من قطب شمالى ، نتيجة لتجاذب الأقطاب المختلفة وتنافر المتشابهة . ونصل إلى حالة أدنى طاقة وضع للنظام عندما تصبح المغناطيسات على نحو يشبه ما هو موضح بالشكل 19-33 (أ) . ويلاحظ أن المغناطيسات المرتبة بهذه الطريقة إنما تكافئ مغناطيسا واحدًا كبيرًا .

فإذا حركت هذه المغناطيسات بعنف (ربما إذا هز شخص ما اللوح الذى تتراص عليه عند استقرارها) ، فإنها ستتحرر من النظام الذى كانت عليه ويظهر الشكل 19-33 (ب) . ويلاحظ فى هذه الحالة أن المغناطيسات المنفردة لم تعد مصفوفة معًا لتكون قضيبًا مغناطيسيًا قويًا .

ويتحقق وضع مشابه لهذا بالنسبة للذرات داخل الجسم الصلب ، حيث تقوم الاهتزازات الحرارية بتحريك النظام فتمنع الذرات بهذا من ترتيب أنفسها كما فى الشكل 19-33 (أ) . على أن مغناطيسات ذرية معينة فقط ـ كالحديد والمواد الفرومغناطيسية الأخرى ـ هى التى تستطيع الاحتفاظ باصطفافها عند درجات الحرارة العادية . وحتى هذه الذرات تكتسب ما يكفى من الطاقة الحرارية عند تسخينها بدرجة مناسبة ، لكى تتحرر من النظام الذى كانت عليه وتتضارب اتجاهاتها كما فى (ب) . ودرجة الحرارة التى يحدث عندها هذا محددة تمامًا لكل نوعية من الذرات وتسمى **درجة حرارة كورى** . وهناك قوى أخرى أكثر تعقيدًا بكثير بين الذرات الفرومغناطيسية إلى جانب القوة المغناطيسية طبعًا . ولا يمكن فهم هذه القوة إلا فى إطار ميكانيكا الكم ولذا لن نتمكن من الاسترسال فى مناقشتها هنا ، وإن كانت تلعب دورًا رئيسيًا فى ترتيب المغناطيسات الذرية .



شكل 19-34:
(أ) نطاقات متجهة عشوائيًا فى عينة غير ممغنطة . (ب) تنمو النطاقات المصفوفة فى اتجاه المجال على حساب النطاقات غير المصفوفة فى اتجاه المجال وذلك عندما توضع المادة فى مجال مغناطيسى خارجى . وهذا ما يكسب العينة مجالاً مغناطيسيًا صافيًا .

وتكون المغناطيسات الذرية لمعظم المواد ـ إذا وجدت ـ متجهة عشوائيًا كما فى الشكل 19-33 (ب) . إلا أن المواد الفرومغناطيسية تتكون عادة من مناطق صغيرة تكون الذرات فى كل منها مصفوفة فى اتجاه واحد . ويُسمى كل من هذه المناطق المرتبة **نطاقًا** (الشكل 19-33) . وتحتوى قطعة الحديد العادية على نطاقات بكل منها نحو 10^{16} ذرة . ومعنى هذا أن الأبعاد الخطية للنطاق ليست سوى كسر صغير من المليمتر . على أن النطاقات فى قطعة حديد غير ممغنطة تأخذ اتجاهات عشوائية كما فى الشكل 19-34 (أ) . وعند مغنطة قضيب من الحديد فإن على النطاقات بداخله أن تصطف فى صفوف ، ويتم هذا على النهج التالى .

سنفترض أننا بدأنا بقضيب من الحديد وكان غير ممغنط كما يوضح الشكل 19-34 (أ) وكما نعلم فإن للملف اللولبى الذى يحمل تيارًا مجال مغناطيسى يتخلل لفاته . والآن ، سنضع القضيب الحديدى فى الملف اللولبى ؛ حيث تتعرض النطاقات لقوى من جانب المجال المغناطيسى للملف . وستنمو تلك النطاقات التى تتخذ اتجاه المجال ، بينما يتقلص حجم تلك التى تتخذ اتجاهات أخرى . والنتيجة النهائية لهذه العملية هى جعل النطاقات تصطف موازية للمجال كما هو موضح فى الجزء (ب) . لقد أصبح الحديد الآن قضيبًا مغناطيسيًا له قطب شمالى وآخر جنوبى . فإذا كان من السهل توجيه النطاقات فإننا نتعامل مع **حديد مطاوع** ، أما فى حالة **الحديد الصلب** فلابد من أن يكون المجال الخارجى قويًا جدًا أو أن ترج النطاقات بالحرارة أو بطرق ميكانيكية حتى يمكن جعلها تنمو فى اتجاه المجال . (إن تمييز الحديد بصفتى **المطاوع والصلب** يعود إلى الخواص المغناطيسية فحسب ولا علاقة لهما بالصلابة

الفيزيائية) . وعلى أية حال من الممكن ترتيب النطاقات بشكل تام تقريبا للحصول على قضيب مغناطيسى قوى .

وإذا ما تم ترتيب النطاقات فى صفوف فإن المجال المغناطيسى يصبح مكونًا من جزءين . أولهما المجال الصغير الأصلى للملف اللولبى ، وثانيهما المجال الذى يخلقه القضيب المغناطيسى وهو أكبر مئات المرات ـ عادة ـ من مجال الملف اللولبى . **وتسمى المجموعة المكونة من ملف لولبى وقطعة من الحديد المطاوع مغناطيسًا كهربائيًا .**

وعندما يطفأ التيار المار فى الملف اللولبى ، فإن النطاقات فى قضيب الحديد المطاوع تعود تقريبًا إلى الحالة العشوائية الأصلية التى كانت عليها ، وذلك لأن الحركة الحرارية تجعل النطاقات تتبعثر . وهذا الوضع مطلوب فى المغناطيس الكهربى لأنه يتيح لنا أن نديره أو نطفئه حسب الطلب . ومن ناحية أخرى فإن قطعة من الحديد الصلب إذا وضعت داخل ملف لولبى فإنها ستحتفظ بمعظم ترتيبها عند إخراجها من الملف اللولبى وتصبح بهذا قضيبًا مغناطيسيًا دائمًا .

ويمكن تمييز درجة استجابة المادة لمجال مغناطيسى خارجى ، بواسطة كمية تسمى **الإنفاذية المغناطيسية النسبية** ، K_m . افترض ، مثلاً ، أن لدينا ملفًا لولبيًا طويلاً جدًا يحمل تيارًا يخلق مجالاً B_0 ، وسنقوم بملء باطن هذا الملف بمادة ما . فيصبح المجال الكلى هو B ويتكون من مجموع B_0 وأى مجال ناشئ عن اصطفاف المغناطيسيات الذرية .

تعرف الإنفاذية المغناطيسية النسبية K_m لمادة ما، بإنها النسبة بين المجال الكلى B والمجال المغنط B_0 :

$$K_m = \frac{B}{B_0}$$

وتتراوح قيم K_m فى المواد الفرومغناطيسية بين 100000 – 100 والجدول 1–19 يورد بعضًا من هذه المواد وقيم K لها . كما يضم الجدول أيضًا فئتين من المواد الأخرى . فبعضها وهو يسمى مواد ديامغناطيسية يقلل من قيمة المجال . من ثم تكون قيم K_m له أقل من الواحد الصحيح وإشارتها سالبة . والبعض الآخر ويسمى مواد **بارامغناطيسية** وتزيد من قيمة المجال بشكل طفيف ولذا فإن قيم K_m لها أكبر قليلاً من الواحد الصحيح .

وسنلخص فيما يلى ما تعلمناه حول الخواص المغناطيسية للمواد . عندما توضع معظم المواد فى مجال مغناطيسى فإنها نادرًا ما تؤثر فيه . على أن عددًا قليلاً جدًا ، ومنها الحديد وسبائكه ترفع من شدة المجال المغناطيسى الذى توضع فيه ، ودائمًا ما يقوى المجال عدة مئات من المرات . وإلى هذه القدرة على تكبير المجال المغناطيسى ، تعود الأهمية الأولى للحديد فى كثير من تطبيقات المغناطيسية .

الجدول 1-19 قيم الإنفاذية المغناطيسية النسبية عند درجة حرارة الغرفة لمواد مختارة .

المادة	الإنفادية النسبية K_m
فيرومغناطيسية	
كوبالت	250
نيكل	600
حديد	5,000
سبيكة « بيرمالوى »	25,000
سبيكة « ميومتال »	100,000
بارامغناطيسية	
الهواء	1.0000004
الونيوم	1.000023
مغنسيوم	1.000012
يورانيوم	1.00040
ديامغناطيسية	
البزموت	0.99983
الزئبق	0.99997
الفضة	0.99998
النحاس	0.99999
الماء	0.99999

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) قاعدة اليد اليمنى لمجال مغناطيسى ، (ب) قاعدة اليد اليمنى لقوة مغناطيسية ، (جـ) شدة المجال المغناطيسى ، (د) وحدتى تسلا وجاوس ، (هـ) جهاز انتقاء السرعة ، (و) الملف اللولبى ، (ز) أثر هول ، (ح) المادة الفرومغناطيسية ، (ط) النطاق ، (ى) المغناطيس الكهربى ، (ك) العزم المغناطيسى ، (ل) حركة مقياس (م) مجزئ التيار (مقاومة متصلة على التوازى) . (ن) الإنفاذية المغناطيسية النسبية .

2 أن ترسم تخطيط المجال المغناطيسى بالقرب من (أ) مغناطيسات ذات أشكال مختلفة ، (ب) سلك مستقيم حامل للتيار ، (جـ) حلقة من سلك حاملة للتيار ، (د) ملف لولبى .

3 أن تستخدم بوصلة لتحديد اتجاه خطوط المجال فى منطقة ما .

4 أن تحسب مقدار واتجاه القوة المؤثرة على تيار فى سلك مستقيم موضوع فى مجال مغناطيسى معروف .

5 أن تستخدم المعادلة $F = B_{\perp}IL$ لتحسب إحدى الكميات إذا عُلمت الكميات الأخرى .

6 أن تستخدم المعادلة $F = qvB_{\perp}$ لتحسب إحدى الكميات إذا عُلمت الكميات الأخرى وتحسب نصف قطر المسار الذى يتبعه جسيم ذو شحنة وكتلة معلومتين ويتحرك عموديًا على مجال مغناطيسى معلوم .

7 أن تحسب المجال المغناطيسى (أ) على مسافة معينة من سلك مستقيم حامل للتيار ، (ب) عند مركز ملف به N لفة ويحمل تيارًا معلومًا (جـ) فى باطن ملف لولبى يحمل تيارًا معلومًا . وأن تحسب الحالة (جـ) عندما يكون الملف اللولبى فارغًا وعندما يكون ممتلئًا بمادة ذات K_m معلومة .

8 أن تختار من قائمة المواد الشائعة ، تلك التى تغير المجال المغناطيسى بصورة كبيرًا إذا وضعت فيه .

9 أن تصف ما يحدث عندما يوضع قضيب من مادة مغناطيسية بدلالة النطاقات لو كان القضيب ممغنطًا أو غير ممغنط .

10 أن تشرح كيف يتيح لنا أثر هول تعيين إشارة ناقلات الشحنة .

11 أن تذكر الطريقة التى يدور بها ملف يحمل تيارًا عندما يكون فى وضع معين فى مجال مغناطيسى وأن تحسب عزم الدوران المؤثر على الملف عندما يكون هناك قدر كاف من البيانات .

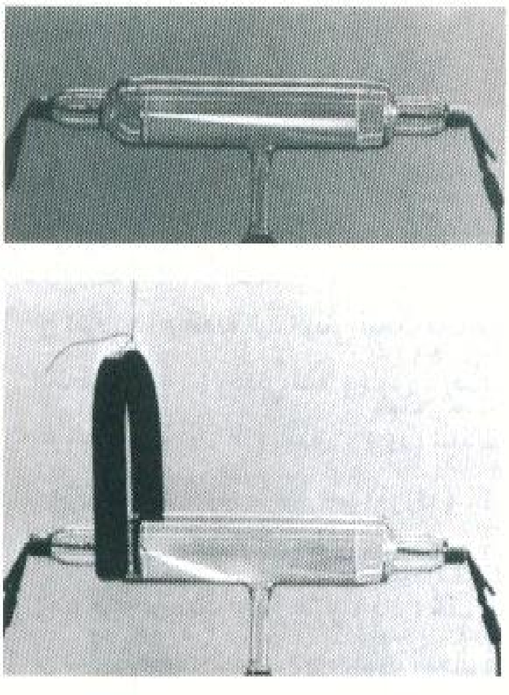
12 أن تحدد مكان القطبين الشمالى والجنوبى بالنسبة لعروة تحمل تيارًا . وأن تشرح المقصود من متجه العزم المغناطيسى بالنسبة لعروة تيار .

13 أن تشرح السمات الرئيسية لحركة مقياس . وأن تذكر كيف يستخدم لعمل أميتر أو فولتميتر .

أسئلة وتخمينات

1 قرب القطب الشمالى لقضيب مغناطيس من مسمار حديدى غير ممغنط . ما الذى يفعله المجال المغناطيسى للمغناطيس فى المسمار ؟ ولماذا ينجذب المسمار إلى المغناطيس ؟

2 وضعت عروتان دائريتان متحدتا المركز فوق منضدة . وكانت العروة الكبرى تحمل تيارًا مقداره 10 A ويتدفق فى عكس اتجاه عقارب الساعة ، وتحمل الصغرى تيارًا مقداره 5 A فى اتجاه عقارب الساعة . أوصف القوى المؤثرة على كل من العروتين .



شكل م 19-1

3 يوضح الشكل م 1-19 أن هناك سلكين عند جهد مرتفع يجعلان حزمة من الجسيمات المشحونة تقذف نحو اليمين خلال أنبوبة مفرغة جزئيًا . وتتم رؤية مسار الجسيمات باستخدام شاشة فلورية موضوعة على امتداد طول الأنبوبة وعند اقتراب مغناطيس من الأنبوبة فإن الحزمة تنحرف . كيف يمكنك تحديد إشارة الشحنة على تلك الجسيمات ؟

4 صف حركة إلكترون قذف إلى داخل ملف لولبى طويل وبزاوية صغيرة مع محور الملف اللولبى .

5 يقال أحيانًا أن القطب الشمالى للأرض هو قطب جنوبى والعكس بالعكس . فما معنى هذا ؟

6 عندما تقذف حزمة من الإلكترونات فى منطقة معينة من الفضاء ، فإن الإلكترونات تتحرك خلال تلك المنطقة فى خط مستقيم . هل يمكننا استنتاج أنه لا يوجد مجال كهربى فى تلك المنطقة ؟ أو أنه لا يوجد مجال مغناطيسى ؟

7 قذفت حزمة من الإلكترونات ، فى تجربة معينة ، باتجاه المحور x الموجب فانحرفت نحو المحور y الموجب فى المستوى xy . فإذا كان هذا الانحراف ناتج عن وجود مجال مغناطيسى ، فما هو اتجاه هذا المجال ؟ كرر المسألة لو كان هناك مجال كهربى بدلاً من المغناطيسى .

8 تنحرف حزمة من الجسيمات المشحونة عندما تمر خلال منطقة معينة من الفضاء . كيف يمكنك بعمل قياسات على حركة الحزمة أن تحدد المجال الذي يسبب الانحراف ؟ أهو مجال مغناطيسي أم كهربي ؟

9 قذف بروتون من أصل الإحداثيات باتجاه المحور x الموجب وكان هناك مجال مغناطيسي منتظم في الاتجاه y الموجب . (أ) صف حركة البروتون موليًا اهتمامًا خاصًا بالأرباع التي يتحرك فيها . (ب) أعد السؤال بالنسبة لإلكترون . (جـ) أعد مرة أخرى لو أن $v_z = 0$ ، $v_x = v_y$. (د) أعد لو أن $v_z \neq 0$ ، $v_x = v_y$.

10 إننا نعرف أن الإلكترونات داخل أنبوبة التليفزيون تقذف من أحد طرفي الأنبوبة إلى الطرف الآخر حيث تصطدم بشاشة فلورسنتية . افترض أن أخاك الصغير يصر على أن مدرس العلوم العامة في فصله يقول أن البروتونات هي التي تستعمل وليس الإلكترونات . كيف يمكنك أن تثبت له أنه مخطئ دون أن تضطر إلى فك الجهاز ؟

11 افترض أن لديك مادة رديئة التوصيل ولكنها مع ذلك توصل ، بما يكفي للحصول على تيار يمكن قياسه خلالها . كيف نستطيع تقرير ما إذا كان التيار مكونًا من شحنات موجبة أو سالبة ، أو من كليهما ؟ اقترح ما تشاء من الطرق المتعددة .

12 يقترح إيجاد قوة دفع لسفينة فضاء على النحو التالي . يتم توليد الكهرباء بواسطة مفاعل نووي أو بوسيلة أخرى . ثم تمرر تيارات ضخمة في قضبان من النحاس مثبتة بسفينة الفضاء بحيث أن القوى المؤثرة على تلك القضبان بفعل المجال المغناطيسي للأرض تكون كافية لدفع السفينة . ما هي أوجه اعتراضك على مثل هذه الفكرة ؟

13 لا تستطيع الأشعة الكونية (وهي جسيمات مشحونة قادمة إلى الأرض من الفضاء الخارجي) أن تصل إلى سطح الأرض ما لم تكن طاقاتها عالية جدًا . وأحد أسباب ذلك أن عليها اختراق جو الأرض . على أنه بالنسبة للجسيمات القادمة نحو خط الاستواء على امتداد نصف قطر الأرض فإن التأثيرات المغناطيسية تكون هي الأخرى مهمة . اشرح السبب مبينًا لماذا تصل الجسيمات إلى القطبين دون مواجهة هذه الصعوبة .

14 حاول أن تعطي تقديرًا لرتبة مقدار الإزاحة التي تعانيها حزمة إلكترونية فوق شاشة التلفزيون تحت تأثير المجال المغناطيسي للأرض .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

وحدات المجال المغناطيسي (B)

$$1 \text{ tesla (تسلا) } (T) = 1 \text{ N.m/A}$$

$$1 \text{ gauss (جاوس) } (G) = 10^{-4} \text{ T}$$

إنفاذية الفراغ (μ_0)

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$$

العزم المغناطيسي لعروة تيار (μ)

μ = المساحة × التيار الكلي بالعروة

$= ANI$

ووحدات μ هي $A.m^2$.

واتجاه μ هو اتجاه الإبهام اليمنى عندما تنقبض أصابع اليد اليمنى متخذة اتجاه التيار حول العروة .

تعريفات ومبادئ أساسية :

المجال المغناطيسي (B)

القوة المغناطيسية المؤثرة على وحدة الأطوال من سلك يحمل تيارًا فى مجال مغناطيسى **B** هى

$$B = \frac{F/L}{I}$$

حيث L هو طول السلك . وعندما تكون F و L و I معبرًا عنها بوحدات SI فإن B تقاس بوحدات تسلا (T) .

القوة المغناطيسية المؤثرة على تيار

تكون القوة المغناطيسية المؤثرة على وحدة الأطوال من سلك يحمل تيارًا فى مجال مغناطيسى **B** هى :

$$\frac{F}{L} = BI \sin\theta$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين **B** و **I** . ويكون اتجاه القوة متعامدًا مع كل من **B** و **I** بالترتيب الذى تحدده قاعدة اليد اليمنى .

خلاصة :

1 تكون القوة المغناطيسية المؤثرة على تيار ما عند أقصى قيمة لها إذا كان التيار **I** متعامدًا مع **B** وتكون صفرًا عندما يكون **I** موازيًا (أو موازيًا ومتضادًا) للمجال **B** .

قاعدة اليد اليمنى للقوة المغناطيسية المؤثرة على تيار

أشر بأصابع يدك اليمنى باتجاه المجال **B** على أن تشير الإبهام اليمنى باتجاه التيار . أما القوة المغناطيسية المؤثرة على التيار فتكون فى الاتجاه المواجه لراحة اليد

القوة المغناطيسية المؤثرة على شحنة متحركة

تتعرض شحنة q تتحرك بسرعة **v** فى مجال مغناطيسى **B** لقوة مقدارها ،

$$F = qvB_{\perp}$$

حيث $B_{\perp}$ هى مركبة **B** المتعامدة مع السرعة **v** . ويتحدد اتجاه القوة المؤثرة على الشحنات الموجبة باستخدام قاعدة اليد اليمنى للتيارات . أما اتجاه القوة المؤثرة على الشحنات السالبة فيكون عكس هذا .

خلاصة :

1 بما أن القوة المغناطيسية متعامدة دائمًا مع اتجاه الحركة **v** ، فإن المجال المغناطيسي الموازى للحركة لا يمكنه عمل شغل على شحنة متحركة .

2 سيجعل المجال المغناطيسى المنتظم الجسيم المشحون المتحرك ، يدور فى دائرة نصف قطرها

$$r = \frac{mv}{qB}$$

حيث m هى كتلة الجسم .

أثر هول

عندما يوضع موصل ذو مقطع مستعرض مستطيل الشكل فى مجال مغناطيسى متعامد مع التيار المار به فإن فرقًا للجهد يتكون ويكون متعامدًا مع كل من **I** و **B** وهذا هو ما يسمى بجهد هول الذى يعطى بالمعادلة :

$$V_H = vBd$$

حيث v هى السرعة المتوسطة « للانسياق » بالنسبة للشحنات الحاملة للتيار و d هو أحد أبعاد الموصل العمودى على **I** و **B** .

وتعتمد قطبية (إشارة) هذا الجهد على إشارة ناقلات الشحنة .

القوة المغناطيسية بين تيارين متوازيين

القوة المغناطيسية لوحدة الأطوال والتى يؤثر بها تياران متوازيان كل على الآخر .

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b}$$

حيث b هى المسافة بين التيارين . وتكون القوة تجاذبية لو كان التياران فى نفس الاتجاه وتنافرية لو كان أحدهما فى عكس اتجاه الآخر .

خلاصة :

1 تتخذ هذه الظاهرة لتعريف الأمبير . ثم يشتق كولوم الشحنة منه .

$$1\,C = 1\,A.s$$

المجال المغناطيسى الناشئ عن تشكيلات معينة للتيار

تيار طويل مستقيم :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

مركز ملف دائرى (نصف قطره a)

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a}$$

فإذا كان بالملف N لفة ، يضرب الطرف الأيمن فى هذه المعادلة فى N .

الملف اللولبى

$$B = \frac{\mu_0 N I}{L} = \mu_0 n I$$

حيث : L هو طول الملف اللولبى ، N العدد الكلى للفات ، n عدد اللفات لوحدة الأطوال

عزم الدوران المؤثر على عروة تيار

عندما توضع عروة تيار فى مجال مغناطيسى فإنها تميل إلى إدارة نفسها بحيث يتخذ عزمها المغناطيسى μ اتجاه المجال المغناطيسى **B** . ويعطى العزم الدورانى بالمعادلة :

$$\tau = \mu B \sin\theta$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين μ و **B** .

المواد المغناطيسية

تقاس استجابة المواد الموضوعة فى المجالات المغناطيسية بإنفاذيتها المغناطيسية النسبية K_m . ويعبر عنها بالنسبة بين المجال المغناطيسى الكلى B الناشئ عن وجودها فى مجال مغناطيسى خارجى B_0 إلى المجال الخارجى :

$$K_m = \frac{B}{B_0}$$

وبناء على هذا العامل تنقسم المواد إلى ثلاث فئات :

1 الفرومغناطيسية : $K_m \gg 1$

2 البارامغناطيسية : $K_m > 1$

3 الدايا مغناطيسية : $K_m < 0$

مسائل

الأقسام من 19–1 إلى 19–5

1 يحمل خط نقل للقدرة الكهربية تيارًا مقداره 32 A متجهًا نحو الغرب مباشرة في منطقة يكون فيها المجال المغناطيسي موازيًا لسطح الأرض ومتجهًا نحو الشمال مباشرة $B = 8.2 \times 10^{-4}$ T . أوجد مقدار واتجاه القوة التي يؤثر بها المجال على جزء من خط القدرة طوله 2.0 m .

2 يحمل موصل ما تيارًا مقداره 24 A إلى أعلى بدءًا من سطح الأرض . والمجال المغناطيسي للأرض في تلك المنطقة أفقي ويتجه نحو الشمال مباشرة وشدته 8.0×10^{-4} T . ما هو مقدار واتجاه القوة المؤثرة على جزء طوله 50 cm من الموصل ؟

3 احسب القوة المؤثرة على جزء طوله 1 m من سلك يحمل تيارًا شدته 6 A في منطقة ذات مجال مغناطيسي منتظم شدته 0.75 T ويتجه عموديًا على السلك .

4 يحمل موصل ما تيارًا شدته 12 A في اتجاه يصنع زاوية مقدارها 45° بالنسبة لاتجاه مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.5 T احسب مقدار القوة المؤثرة على جزء طوله 2.5 m من الموصل .

5 تستقر عروة دائرية من السلك ، نصف قطرها $r = 10.0$ cm فوق منضدة وتحمل تيارًا شدته 1.8 A . وتتواجد العروة في مجال مغناطيسي رأسي منتظم شدته 0.1 T ويتجه إلى أعلى . (أ) أوجد القوة الكلية المؤثرة على العروة من قبل المجال المغناطيسي . (ب) أوجد بالتقريب القوة المؤثرة على طول قدره 0.2 mm من العروة .

■ 6 احسب اتجاه ومقدار القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي للأرض على سلك طوله 120 m مشدود أفقيًا بين عمودين ويحمل تيارًا مقداره 80 A . مقدار متوسط المجال المغناطيسي للأرض في هذه المنطقة هو 4.0×10^{-5} T واتجاهه يميل بزاوية مقدارها 50° على اتجاه التيار .

■ 7 سلك أفقي يمتد في الاتجاه شرق ـ غرب ، وكانت كتلة المتر منه 0.18 g ويحمل تيارًا مقداره I . ويتواجد السلك في مجال مغناطيسي شدته 0.5 T ويتجه أفقيًا نحو الشمال . أوجد أدنى تيار يجعل القوة المغناطيسية تعادل وزن السلك .

■ 8 يتجه تيار شدته 15 A في سلك ما باتجاه المحور x الموجب ومتعامدًا مع اتجاه مجال مغناطيسي . ويتعرض السلك لقوة مغناطيسية مقدارها 0.18 N/m لوحدة الأطوال وتتجه في اتجاه y الموجب . أوجد اتجاه ومقدار المجال المغناطيسي في هذه المنطقة .

■ 9 قضيب موصل دقيق طوله 1 m وكتلته 24 g يحمل تيارًا مقداره 0.3 A . ما هي أدنى شدة للمجال المغناطيسي المطبق عموديا على القضيب والتي تجعله يطفو في الهواء دون دعامة ؟

10 يميل سلك في المستوى xy على محور x الموجب بزاوية مقدارها 30° ، ويحمل تيارًا شدته 3 A في اتجاه قيم x و y الموجبة . وقد طبق على السلك مجال مغناطيسي شدته 0.04 T . أوجد مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على قطعة من السلك طولها 0.5 m إذا كان المجال متجهًا (أ) بامتداد محور x الموجب ، (ب) بامتداد محور y السالب و (جـ) بامتداد محور z الموجب .

11 يستقر سلك موصل دقيق في المستوى xy صانعًا زاوية مقدارها 24° مع الاتجاه الموجب للمحور y ، ويحمل تيارًا مقداره

6.0 A نحو قيم x و y السالبتين . وكان المجال المغناطيسي في المنطقة هو 0.04 T . أوجد مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على قطعة طولها 1 m من الموصل إذا كان المجال متجهًا على طول (أ) محور x السالب ؛ (ب) محور y السالب ؛ (جـ) محور z الموجب .

القسم 19-6

12 قذف بروتون في الاتجاه الموجب لمحور x بسرعة مقدارها 5.0×10^4 m/s . أوجد اتجاه ومقدار القوة المؤثرة عليه من جانب مجال مغناطيسي شدته 0.04 T إذا كان المجال يتجه في (أ) اتجاه محور y السالب ، (ب) اتجاه محور z السالب ، (جـ) اتجاه محور x السالب .

13 قذف إلكترون في الاتجاه الموجب لمحور y بسرعة مقدارها 6.0×10^5 m/s . أوجد اتجاه ومقدار القوة المؤثرة عليه من جانب مجال مغناطيسي شدته 0.005 T إذا كان المجال في (أ) اتجاه محور y السالب ، (ب) اتجاه محور x الموجب و (جـ) اتجاه محور z السالب .

14 يتحرك بروتون عموديًا على مجال مغناطيسي شدته 0.08 T . ما السرعة التي على البروتون التحرك بها ، إذا كانت القوة المغناطيسية المؤثرة عليه مقدارها 5.0×10^{-14} N ؟

15 يتعرض إلكترون يتحرك بسرعة مقدارها 4.8×10^5 m/s عموديًا على مجال مغناطيسي لقوة مقدارها 7.2×10^{-11} N . ما هو مقدار المجال المغناطيسي ؟

16 يتحرك إلكترون في المستوى xy بسرعة مقدارها 4.0×10^5 m/s واتجاهها يصنع زاوية مقدارها $30°$ فوق المحور x الموجب . ثم طبق مجال مغناطيسي شدته 0.065 T على الإلكترون . أوجد اتجاه ومقدار القوة المغناطيسية التي يتعرض لها الإلكترون إذا كان اتجاه المجال هو اتجاه (أ) محور x السالب ، (ب) محور y الموجب ، (جـ) محور z الموجب .

17 يتحرك بروتون في المستوى xy بسرعة مقدارها 3.6×10^4 m/s في اتجاه يصنع زاوية مقدارها $60°$ فوق محور x الموجب . احسب مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على البروتون إذا كان المجال المغناطيسي 0.004 T متجهًا في اتجاه (أ) محور y السالب ، (ب) محور x السالب ، (جـ) محور z الموجب .

18 يتحرك بروتون بسرعة مقدارها 6.0×10^7 m/s خلال مجال مغناطيسي شدته 1.6 T . ما هو مقدار الزاوية المحصورة بين سرعة البروتون واتجاه المجال المغناطيسي لو كان البروتون يتعرض لقوة مقدارها 1.3×10^{-11} N ؟

■ 19 يتحرك بروتون أفقيًا بسرعة مقدارها 4×10^6 m/s في اتجاه متعامد مع مجال مغناطيسي . (أ) ما هي شدة المجال المغناطيسي اللازمة لمعادلة وزن البروتون تمامًا وجعله يستمر في الحركة الأفقية ؟ (ب) أي اتجاه يجب على هذا المجال أن يوجد فيه ؟

■ 20 يتحرك بروتون عموديًا على مجال مغناطيسي منتظم بسرعة مقدارها 2×10^6 m/s لعجلة (تسارع) مقدارها 3×10^{12} m/s^2 في الاتجاه السالب لمحور x في اللحظة التي تكون سرعته في الاتجاه الموجب للمحور z . أوجد مقدار واتجاه المجال المغناطيسي .

■ 21 أعد المسألة السابقة بالنسبة للإلكترون .

■ 22 عجِّل (سرِّع) إلكترون في فرق للجهد مقداره 3000 V ثم دخل منطقة بها مجال مغناطيسي منتظم مقداره 1.5 T . ما هي (أ) أقصى ، (ب) أدنى قيمة للقوة التي يتعرض لها الإلكترون في المجال المغناطيسي ؟ ما هي قيم الزوايا المحصورة بين B وسرعة الإلكترون التي تكون عندها القوة عند حديها الأقصى والأدنى ؟

الأقسام من 7-19 إلى 9-19

23 يتحرك بروتون بسرعة مقدارها 4×10^5 m/s عموديًا على مجال مغناطيسي منتظم شدته 24 mT . صف المسار الذى يتحرك فيه البروتون بطريقة كمية* .

24 صف بطريقة كمية المسار الذى يتبعه إلكترون يتحرك بسرعة مقدارها 6×10^6 m/s عموديًا على مجال مغناطيسي شدته 2 mT .

25 يتحرك إلكترون فى مدار دائرى نصف قطره 1.2 m فى منطقة بها مجال مغناطيسى منتظم . كم سيكون نصف قطر المدار لو أن شدة المجال المغناطيسى انخفضت إلى نصف القيمة الأصلية ؟

26 يتحرك أيون وحيد الشحنة الموجبة ، كتلته 4.56×10^{-27} kg فى اتجاه ضد عقارب الساعة فى المستوى xy فى مسار دائرى نصف قطره 4 cm بسرعة مقدارها 2×10^4 m/s . احسب مقدار واتجاه المجال المغناطيسى .

27 تنبعث جسيمات ألفا من مصدر مشع بسرعة مقدارها 1.66×10^7 m/s . ما هى شدة المجال المغناطيسى المتعامد مع حركة جسيمات ألفا والتى تجعلها تتحرك فى مسار دائرى نصف قطره 0.80 m ؟

(كتلة جسيم ألفا هى 6.64×10^{-27} kg وشحنته ضعف شحنة البروتون) .

■ 28 عُجِّل أيون ثنائى الشحنة الموجبة $(q = +2e)$ وكتلته 6.2×10^{-26} kg خلال فرق للجهد مقداره 300 V ، ثم دخل منطقة مجال مغناطيسى شدته 0.5 T متعامدًا عليه . احسب نصف قطر المسار الدائرى للأيون فى ذلك المجال .

■ 29 عُجِّل بروتون خلال فرق للجهد مقداره 300 kV ثم دخل مجالا مغناطيسيا منتظمًا شدته 0.4 T بحيث كانت سرعته متعامدة مع خطوط المجال . ما هو نصف قطر الدائرة التى يتحرك فيها البروتون ؟

■ 30 يدخل بروتون مُعجَّل خلال فرق جهد مجهول إلى منطقة بها مجال مغناطيسى منتظم شدته 0.06 T ومتعامدًا مع اتجاه سرعة البروتون . إذا كان البروتون يتحرك فى مسار دائرى نصف قطره 35 cm . فما هى طاقته بوحدات الإلكترون فولت ؟

■ 31 يدخل جسيم مشحون بشحنة q ويتحرك بسرعة v منطقة بها مجال مغناطيسى منتظم شدته B بحيث يكون متعامدا معه فيدور فى مسار دائرى نصف قطره r . إثبت أن طاقة حركة الجسيم يمكن كتابتها على الصورة $KE = q^2r^2B^2/2m$ ، حيث m هى كتلة الجسيم .

■ 32 احسب نصف قطر المسار الدائرى لإلكترون طاقة حركته 1 ev ويتحرك عموديًا على مجال مغناطيسى شدته 0.4 T .

33 تتحرك حزمة من البروتونات بسرعة مقدارها 2×10^5 m/s فى خط مستقيم خلال مجالين متعامدين أحدهما كهربى والثانى مغناطيسى داخل جهاز انتقاء السرعة . ما هى شدة المجال المغناطيسى إذا كانت شدة المجال الكهربى 8×10^5 N/C ؟

■ 34 تتحرك حزمة إلكترونات معينة فى خط مستقيم خلال منطقة تعامد مجالين أحدهما كهربى والثانى مغناطيسى فى جهاز انتقاء السرعة ، وكانت شدة المجال المغناطيسى فى المنطقة 0.04 T ، وكانت المسافة بين اللوحين 6 cm وفرق الجهد بينهما 120 V . أوجد (أ) سرعة الإلكترونات و (ب) نصف قطر الدائرة التى يتحرك فيها الإلكترون عندما يكون فرق الجهد بين اللوحين صفرًا .

■ 35 عندما تتحرك حزمة بروتونات عموديًا على مجال مغناطيسى شدته 0.04 T فإنها تدور فى مدار دائرى نصف قطره 1m . ما هى شدة المجال الكهربى المتعامد مع كلٍ من المجال المغناطيسى B وسرعة البروتونات v والتى تجعل البروتونات تتحرك فى خط مستقيم ؟

■ 36 يستخدم فى جهاز انتقاء السرعة مغناطيس لإنشاء مجال مغناطيسى منتظم شدته 0.050 T وزوج من الألواح المعدنية المتوازية بينهما مسافة مقدارها 20 mm لإنشاء مجال كهربى متعامد مع المجال المغناطيسى . ما مقدار فرق الجهد الواجب تطبيقه على اللوحين حتى تمر أيونات وحيدة الشحنة الموجبة سرعتها 6×10^6 m/s من جهاز انتقاء السرعة ؟

* أى على صورة معادلة تحتوى على كميات فيزيائية .

▪ 37 عندما يمر جسيم سريع كالإلكترون خلال هيدروجين سائل فائق التسخين فإن خطًا من الفقاقيع يتكون على امتداد مسار الجسيم . ويبين الشكل م 2–19 مسارات عدة جسيمات في « غرفة الفقاعات » هذه . وترى المسارات وهي منحنية بسبب وجود مجال مغناطيسي متعامد مع الصفحة ويتجه إلى داخلها . فإذا كان مقدار هذا المجال 4.0 mT فهل يكون الجسيم الذي يغادر النقطة a متحركًا نحو اليمين موجبًا أم سالبًا ؟ فإذا اعتبرناه إلكترونًا ، فكم تكون سرعته تقريبًا ؟ (الآثار المرسومة بالحجم الطبيعي وتقع في مستوى الصفحة) .

▪ 38 يبطئ الجسيم الذي يبدأ الحركة من النقطة b من سرعته كلما تحرك خلال الهيدروجين السائل (الشكل م 2–19) ولهذا يتحرك في مسار كالحلزون إلى الداخل . اعتبر نفس البيانات الواردة في المسألة السابقة . واعتبر أن الجسيم إلكترون ثم أوجد مقدار سرعته عند النقطة c .



شكل م 2–19

▪ 39 يترك أيون وحيد الشحنة الموجبة ، ويتحرك بسرعة مقدارها 5×10^{5} m/s ، أثرًا حلزونيًا نصف قطره 8 mm في صورة فوتوغرافية في مستوى متعامد مع المجال المغناطيسي لغرفة فقاعات . والمجال المستخدم في هذه الغرفة مقداره 2 T . احسب كتلة الأيون .

القسمان 10–19 و 11–19

40 احسب شدة المجال المغناطيسي عند نقطة تبعد 20 cm من سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا مقداره 4 A .

41 يحمل سلك مستقيم طويل تيارًا مقداره 5 A . على أي بعد تكون شدة المجال الناشئة عن هذا التيار مساوية لمقدار شدة المجال المغناطيسي للأرض أو 5×10^{-5} T ؟

42 لدينا سلكان طويلان ومستقيمان ومتوازيان وتفصلهما مسافة مقدارها 20 cm . ويحمل كل من السلكين تيارًا مقداره 10 A . أوجد مقدار واتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة تقع في منتصف المسافة بين السلكين ، إذا كان التياران (أ) في نفس الاتجاه و (ب) في اتجاهين متضادين .

▪ 43 لدينا سلكان مستقيمان ومتوازيان تفصلهما مسافة مقدارها 30 cm ويحمل كل منهما تيارًا مقداره 20 A . أوجد مقدار واتجاه المغناطيسي عند نقطة تقع في مستوى السلكين على بعد 10 cm من أحد السلكين و 20 cm من الآخر إذا كان التياران (أ) في نفس الاتجاه و (ب) في اتجاهين متضادين .

▪ 44 يحمل سلك طويل مستقيم تيارًا مقداره 6 A في الاتجاه الموجب لمحور x ، ويحمل سلك آخر تيارًا مسافة شدته 8 A في الاتجاه السالب لمحور y . أوجد مقدار واتجاه محصلة المجالين المغناطيسيين للسلكين عند النقطة $x = 6$ cm و $y = 8$ cm .

45 ما هو مقدار التيار في عروة تيار دائرية نصف قطرها 15 cm ، إذا كان المجال المغناطيسي عند مركز العروة يساوي مقدار شدة المجال المغناطيسي للأرض وهو 5×10^{-5} T ؟

46 وصل ملف قطره 40 cm ومكون من مائة لفة من السلك ببطارية قوتها 9 V والمقاومة الكلية للملف 1.8 Ω . أوجد شدة المجال المغناطيسي عند مركز الملف .

47 يتكون ملف لولبي طويل من 2000 لفة من السلك وطوله 30 cm . فإذا كان قطر الملف 2.4 cm ، أوجد المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي عندما يمر خلاله تيار مقداره 250 mA ؟

48 استخدم ملف لولبي طوله 50 cm ومكون من 1500 لفة لخلق مجال مغناطيسي شدته 0.2 T . ما شدة التيار المطلوبة ؟

■ 49 يمتد سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا مقداره 50 A على محور ملف لولبي طويل مجاله المغناطيسي 4.0 mT . (أ) ما مقدار القوة المؤثرة على قطعة طولها 1.0 cm من السلك ؟ (ب) ما مقدار المجال المغناطيسي الكلي داخل الملف اللولبي على بعد 0.5 cm من محوره ؟

50 لدينا موصلان متوازيان والمسافة بينهما 8 cm ويحمل كل منهما تيارًا مقداره 5 A . أوجد القوة لوحدة الأطوال التي تؤثر على أحد الموصلين بواسطة الآخر عندما يكون التياران (أ) في نفس الاتجاه و (ب) في اتجاهين متضادين .

51 يتجاذب سلكان متوازيان بقوة لوحدة الأطوال مقدارها 2.0×10^{-3} N عندما تكون المسافة بينهما 2 cm . وإذا كان التيار في أحدهما هو 100 A . فما هي قيمة التيار في السلك الآخر ؟

القسم 19-12

52 يستقر ملف مسطح من السلك وبه 40 لفة فوق منضدة أفقية . ومساحة الملف $120\ cm^2$ ويحمل تيارًا مقداره 30 A . أوجد عزم الدوران المؤثر عليه بسبب وجود مجال مغناطيسي 80 mT إذا كانت خطوط المجال (أ) موازية لسطح المنضدة و (ب) متعامدًا على سطح المنضدة ، و (جـ) مائلة بزاوية 30° على الخط الأفقي . (د) ما هو العزم المغناطيسي للملف ؟

53 يستقر ملف مسطح من السلك ، مكون من 40 لفة قبالة الحائط الشمالي لغرفة ما . وكانت مساحة الملف $240\ cm^2$ ويحمل تيارًا مقداره 25 A . أوجد عزم الدوران المؤثر على الملف نتيجة مجال شدته 80 mT إذا كانت خطوط هذا المجال تتجه (أ) نحو الغرب ، (ب) نحو الجنوب ، (جـ) رأسيًا ، (د) في مستوى الخط وبزاوية مقدارها 60° مع الحائط الرأسي ، (هـ) ما هو العزم المغناطيسي للملف ؟

■ 54 علق ملف مستطيل به 600 لفة وأبعاده 5 cm في 6 cm في مجال مغناطيسي شدته 0.8 T . ما هو التيار المار في الملف إذا كان أقصى عزم دوران يؤثر به عليه المجال المغناطيسي هو 0.24 N.m ؟

القسم 19-13

55 تبلغ مقاومة حركة مقياس (جلفانومتر) 50 Ω ويعطي انحرافًا ملء التدريج عند تطبيق جهد مقداره 250 mV بين طرفيه . كيف يمكن تحويله إلى أميتر يقيس 3 A ؟

56 كيف يمكن تحويل الجهاز المذكور في المسألة 55 إلى فولتميتر يقيس 10 V ؟

57 ينحرف مؤشر حركة مقياس (جلفانومتر) ملء تدريجه إذا مر به تيار مقداره 0.010 A ومقاومة المقياس 100 Ω . كيف يمكن تحويله إلى أميتر يقيس 5 A ؟

مسائل إضافية

■ 58 تستقر عروة مربعة من السلك فوق منضدة أفقية وتحمل تيارًا مقداره I ثم طبق على الملف مجال مغناطيسي منتظم شدته B في اتجاه يصنع زاوية مقدارها θ مع الخط الأفقي . إثبت أن القوة الصافية المؤثرة على العروة بسبب المجال صفر .

■ 59 يلاحظ أن جسيمًا مشحونًا يتبع مسارًا دائريًا نصف قطره 8.3 cm في مستوى متعامد مع مجال مغناطيسي منتظم شدته 8.0 mT . وقد وجد من قياسات مستقلة أن كمية تحرك الجسيم هي 2.0×10^{-22} kg.m/s . أوجد مقدار شحنة الجسيم ؟

■■ 60 قذف إلكترون من نقطة أصل الإحداثيات بسرعة مقدارها 3×10^6 m/s وبزاوية مقدارها 60° أعلى محور x . وكان هناك مجال مغناطيسي شدته 0.006 T ويتجه في اتجاه المحور x الموجب . صف مسار الإلكترون بطريقة كمية .

تلميح : حلل سرعة الإلكترون إلى مركبتين إحداهما موازية لمحور x والثانية عمودية عليه .

■■ 61 يخرج أيونان من فتحة مطياف الكتلة ويدخلان منطقة يكون المجال المغناطيسي فيها متعامدًا مع سرعتي الأيونين وشدته 0.4 T ، فإذا كان أحد الأيونين وحيد الشحنة والثاني ثنائي الشحنة وكتلة كل منها 6.6×10^{-27} kg ويتحركان

بسرعة مقدارها 2×10^6 m/s أوجد (أ) نصف قطر المسار الدائرى لكل من الأيونين فى المجال المغناطيسى و (ب) والمسافة التى تفصلهما عندما يكمل كلٌ منهما نصف دائرة ويصطدمان بلوح فوتوغرافى .

62 ملف لولبى به 50 لفة لكل سنتيمتر من طوله ويحمل تيارًا مقداره 10 A . وقد قذف بروتون من نقطة على محور الملف اللولبى بسرعة مقدارها 4×10^5 m/s وبزاوية مقدارها 20° مع المحور . صف المسار الذى يتبعه البروتون بطريقة كمية .
تلميح : حلل السرعة الابتدائية للبروتون إلى مركبتين أحداهما موازية والأخرى متعامدة مع المحور .

63 علق سلك طويل مستقيم طوله 1.6 m ويزن 0.1 N لكل متر من طوله فوق سلك آخر مثبت بحيث كان موازيًا له . ويحمل التيار العلوى تيارًا مقداره 32 A والسفلى 65 A . فإذا كان السلك العلوى يستقر فى مكانه بفضل التنافر المغناطيسى مع السلك السفلى فما مقدار المسافة بين السلكين ؟

64 يستقر ملف مربع من السلك ، طول ضلعه 15 cm وبه 50 لفة وكتلته 100 g فوق منضدة مسطحًا . ويؤثر على الملف مجال مغناطيسى أفقى شدته 0.048 T وموازٍ لأحد الأضلاع . ما هو مقدار التيار المار فى الملف لكى يرتفع أحد الأضلاع عن سطح المنضدة ؟

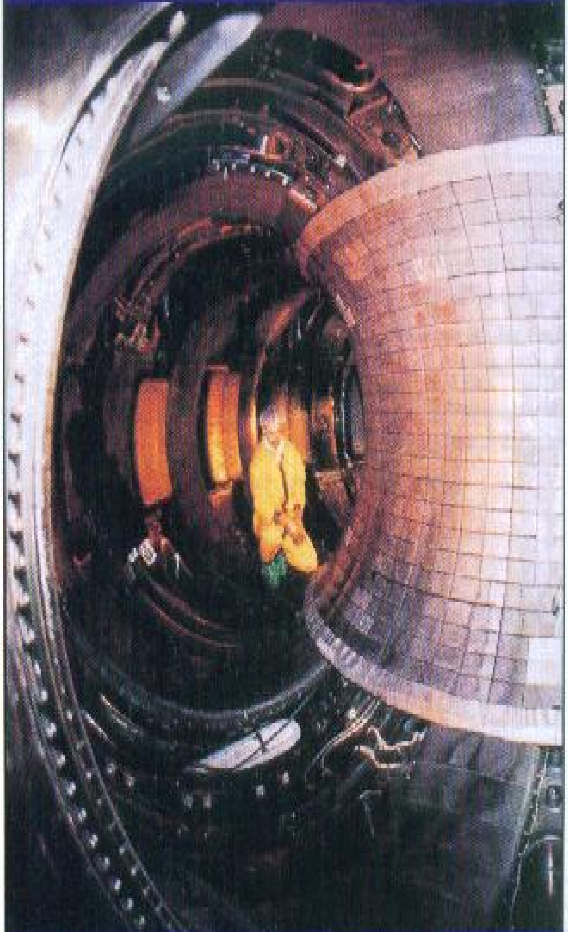
65 يحتوى ملف دائرى من السلك قطره 20 cm على 40 لفة وكتلته 50 g . ويستقر الملف مسطحًا فوق منضدة ويتعرض لمجال مغناطيسى شدته 60 mT ويصنع زاوية مقدارها 30° مع الخط الرأسى . ما مقدار التيار المار فى الملف إذا أريد لجزء من الملف أن يرتفع عن المنضدة ؟

66 تبلغ قيمة المجال المغناطيسى المنتظم داخل ملف لولبى طويل B . وكان نصف القطر الداخلى للملف هو R واتجاه لمجال المغناطيسى موازيًا للمحور . ما هى أقصى سرعة يقذف بها إلكترون قطريًا من على المحور ، إذا كان عليه تجنب الاصطدام بالسطح الداخلى للملف اللولبى ؟

67 وزعت شحنة بإنتظام على سطح أنبوبة مجوفة مستقيمة ومصنوعة من البلاستيك وكانت الشحنة لوحدة الأطوال هى Q والأنبوبة طويلة جدًا . فإذا كانت الأنبوبة تدور حول محورها بتردد قيمته f ، فما مقدار المجال المغناطيسى داخل الأنبوبة والناشئ عن حركة الشحنات على سطحها ؟

68 يتبع إلكترون مسارًا دائريًا نصف قطره 4 cm وهو بداخل ملف لولبى . وكان الإلكترون متحركًا بسرعة مقدارها 2×10^4 m/s . والمجال المغناطيسى للملف اللولبى متعامدًا على مستوى مسار الإلكترون . أوجد (أ) شدة المجال المغناطيسى داخل الملف اللولبى و (ب) التيار المار فى الملف اللولبى لو كان يحتوى على 30 لفة لكل سنتيمتر من طوله .

الفصل العشرون



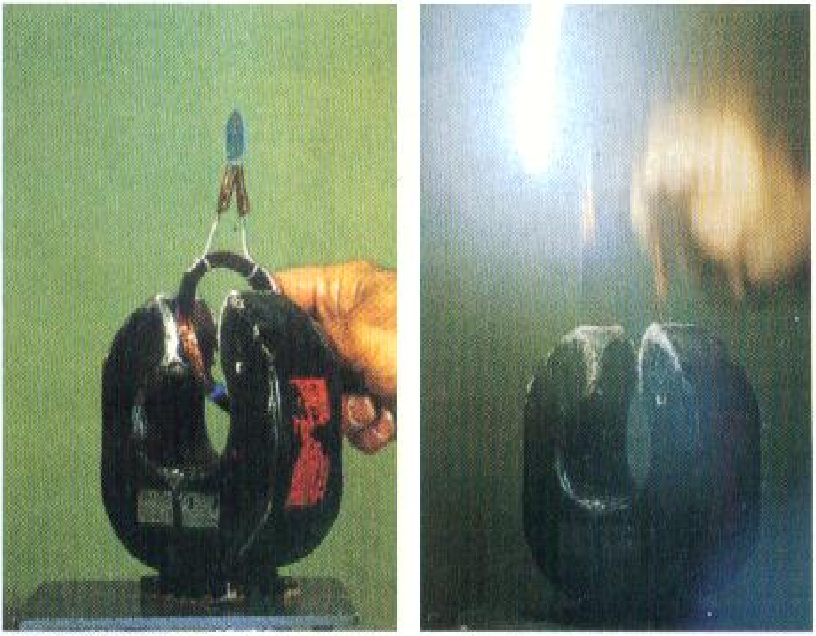
الحث الكهرومغناطيسى

لقد قامت الثورة الصناعية التى غيرت وجه العالم منذ أكثر من قرن من الزمن ، على ثلاثة إنجازات علمية رئيسية : اختراع الآلة البخارية استنادًا إلى الديناميكا الحرارية ، واكتشاف أن القوة التى تدير المحركات تقوم على التفاعل بين التيارات الكهربية مع المجالات المغناطيسية ، واكتشاف أن التيارات يمكن إنتاجها من المجالات المغناطيسية المتغيرة . ولقد ناقشنا الإنجازين الأولين . وسنقوم بدراسة الإنجاز الثالث فى هذا الفصل .

20-1 القوة الدافعة الكهربية المستحثة ـ ق.د.ك المستحثة

لقد تم اكتشاف أن التيارات الكهربية تولد مجالات مغناطيسية على يدى الفيزيائى الدنماركى هانز كريستيان أورستيد عام 1820 . وكما يحدث عادة فى العلم فإن هذا الجانب الجديد الذى تم اكتشافه للطبيعة أدى إلى بحوث غزيرة فى الظواهر المرتبطة به . وقد سار فى أحد دروب العلم التجريبى أولئك الذين حاولوا الإجابة على السؤال التالى : « إذا كانت التيارات تنتج مجالات مغناطيسية ، أفلا يمكن للمجالات المغناطيسية أن تنتج تيارات ؟ » ومضت عشر سنين قبل أن تظهر الإجابة التأكيدية على هذا السؤال على يدى مايكل فاراداى (1791 ـ 1867) فى إنجلترا ، وبشكل مستقل أيضًا على يدى جوزيف هنرى (1797 ـ 1878) بالولايات المتحدة* . وسنقوم الآن بعرض تجربة توضح هذا التأثير بشكل جلى .

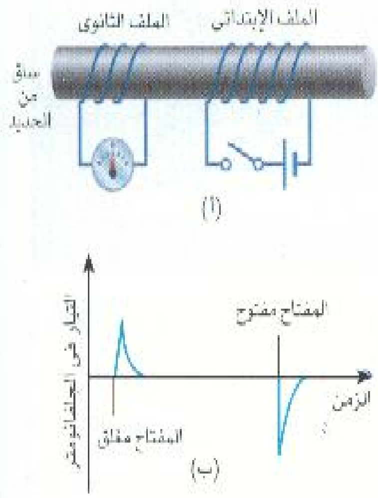
* نشر عمل هنرى الذى أجراه فى سرية نسبية فى ألبانى بنيويورك فى الولايات المتحدة الأمريكية فقط وعرف به عدد قليل من الناس . وهكذا فإن تجاربه لم يكن لها سوى تأثير طفيف على التقدم العلمى فى ذلك الوقت .



عرض مؤثر للتيار المستحث . (أ) ملــف يتصل به بصيلة وميض كالتى تستعمل فــى التصوير وهو بداخل مجال مغناطيسى قوى . (ب) عندما يسحب الملف بسرعة كبيرة من المجال المغناطيسى ، فإن التغير المفــاجئ فى الفيض (التدفق) المغناطيســى الــذى يتخلل الملف يستحث قوة دافعــة كهربيــة كافية لجعل البصيلة تومض .

تستخدم فى هذه التجربة معدات بسيطة كالمبينة فى الشكل 1-20 (أ) ، حيث نرى دائرتين بسيطتين ، والتوصيل فى كل منهما على التوالى . تتكون الأولى من بطاريــة ومفتاح تتصل معًا على التوالى بواسطة سلك طويل ملفوف حول قضيب من الحديد المطــاوع . ويطلق على هذا الملف **ملفًا ابتدائيًا** لأنه يتصل بالبطارية . أما الثانية فيلتــف بــها سـلك مستقل حول القضيب نفسه ويتصل على التوالى بجلفانومتر (يرمز له بالرمز (G)) ولكنها لا تحتوى على أية بطارية وهذا الملف هو ما يسمى **بالملف الثانوى** .

وقد يظن أحد أن التيار خلال الثانوى سيكون صفرًا على الــدوام بمــا أن دائرتــه لا تحتوى على بطارية . . على أن حقيقة ساطعة تتجلى إذا أغلق المفتــاح أو فتح فجـأ فى الدائرة الابتدائية . ففى هذه اللحظة ذاتها سينحرف مؤشر الجلفانومــتر فجــأة ثـم يعود مرة أخرى إلى الصفر . وبعبارة أخرى فإن تيارًا يستحث فى دائرة الملف الثانوى للحظة قصيرة . ويبدو الأمر كما لو كــان بــالدائرة الثانويــة بطاريــة (أى مصدر للقـوة الدافعة الكهربية) لا يستمر وجودها إلا وقتًا قصــيرًا يتـم فيــه فتـح أو قفـل المفتــاح . ويقال فى هذه الحالة أن **قوة دافعة كهربية مستحثة** قد وجدت فــى الملــف الثــانوى خلال تلك اللحظة .

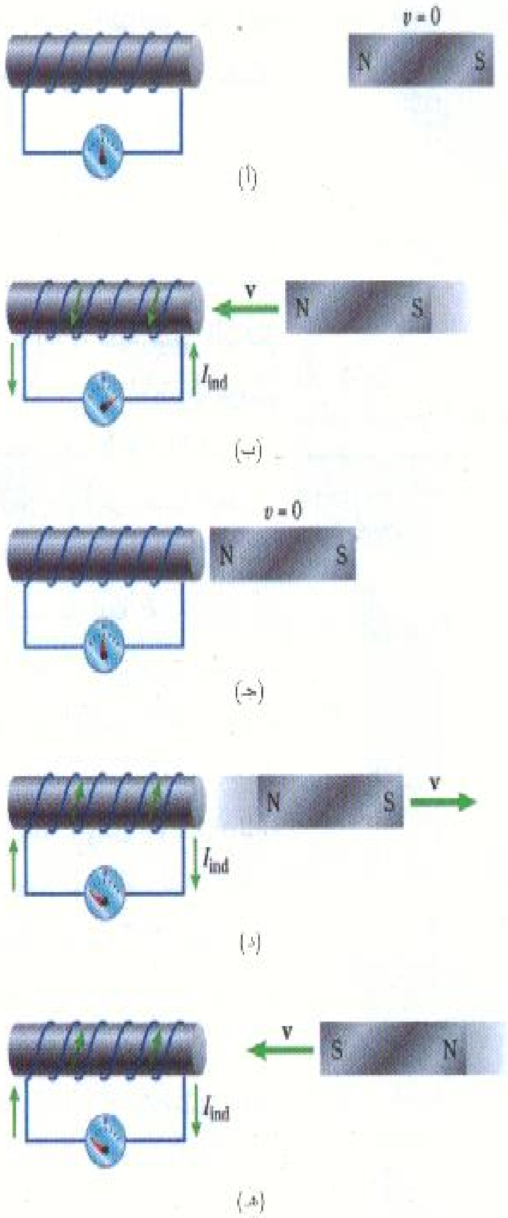


شكل 1-20 :
يتواجد تيار مستحث (تأثيرى) فى الملــف الثانوى فقط عندما يكون التيار المار فـــى الملف الابتدائى فى حالة تغــير . وتكــون نبضات التيار فى الواقع أقصر كثيرًا عمــا هو مبين فى (ب) .

ويوضح الشكل 1-20 (ب) سمة أخرى للتيار والقوة الدافعــة الكهربيــة المستحثين : حيث يسرى التيار المار فى فترة قصيرة فى اتجاه معــين عنـد قفـل المفتــاح ويســرى فـى الاتجاه المضاد عندما يفتح . ويدل هذا على أن اتجاه القــوة الدافعــة الكهربيــة المستحثة يعتمد على ما إذا كان التيار فى الملف الابتدائى فى تزايد أم فى تناقص .

أما الشكل 2-20 فيوضح تجربة ثانية تشبه الأولى إلى حد ما ، حيث تحتوى الدائرة على قضيب مغناطيسى وملف متصل على التوالى مع جلفانومتر وعندما يستقر المغنــاطيس ساكنًا إلى جوار الملف كمـا فـى (أ) و (جـ) فلـن يكون هناك تيار فى الملف . أما إذا

تحرك المغناطيس بالنسبة للملف فإن تيارًا يسرى فى الملف كما هو مبين فـى الأجـزاء (ب) ، (د) ، (هـ) ، وكما نرى فإن قوة دافعة كهربية مستحثة تظـهر فـى المـلف عندمـا يكـون الملف والمغناطيس فى حركة نسبية إزاء بعضـهما البعـض فقـط . **لا تتواجـد قـوة دافعـة كهربية مستحثة إذا لم تكن هناك ظروف متغيرة .**



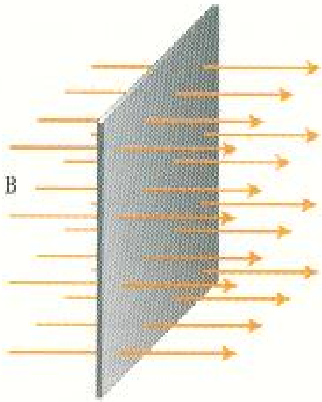
شكل 2–20:
لا يُستحث تيار فى الملف إلا عندما يتحـرك المغناطيس بالنسبة للملف . ويعتمد اتجـاه التيار على اتجاه حركة المغناطيس وعلــى اتجاه مجال المغناطيس .

ويمكننا تحليل هذا الأثر بطريقتين . فقد نلجأ إلى حقيقة أن شحنة تتحـرك فـى مجـال مغناطيسى لابد وأن تتعرض لقوة . وعلى الرغم من أن الشكل 2–20 يبين أن المغنـاطيس هو الذى يتحرك ، إلا أن نفس الشىء تمامًا يحدث إذا ظل المغناطيس ثابتًا وكان المتحـرك هو الملف* . ولننظر ماذا يحدث عندما يتحرك الملـف باتجـاه المغنـاطيس . إن الشحنـات

* يعتبر هذا مثالاً على حقيقة أن الحركة هى كمية نسبية . وعندما تتم الحركة النسبية بين جسمين ، فإن تأثير أحدهما على الآخر لا يكون دالة سوى فى الحركة النسبية . وليس هناك فـرق بـين أى من الجسمين هو الذى يظل ساكنًا وأيهما يتحرك . وسوف يقال أكثر من هـذا حـول الموضـوع فـى الفصل السادس والعشرين عند مناقشة النظرية النسبية .

الحرة داخل السلك ، تتعرض لقوة $quB_\perp$ عندما تتحرك في المجال المغناطيسي للمغناطيس ، كما تنص المعادلة 2-19 . وتتدفق الشحنات تحت تأثير هذه القوة مما يؤدي إلى ظهور التيار المستحث .

ويوضح هذا التناول كيف ترتبط القوة الدافعة الكهربية المستحثة بالظواهر التي درسناها بالفعل ، وسنعود من وقت لآخر إلى استخدام هذا التناول للموقف . على أنه في معظم الحالات العملية يتم استخدام تناول آخر أكثر فائدة ؛ إذ ينطوي على مفهوم التدفق (الفيض) المغناطيسي كما سنرى في الأقسام القادمة .



المساحة = $1\ m^2$

شكل 3-20:
سنتفق على رسم عدد خطوط المجال المغناطيسي بحيث يتناسب مع مقدار B ويخترق وحدة المساحات المتعامدة مع خطوط المجال .

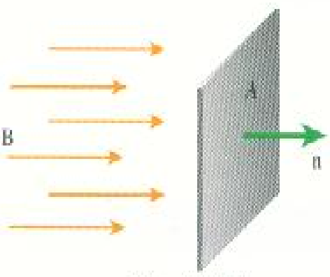
2-20 التدفق المغناطيسي (الفيض)

لقد فسر فاراداي القوة الدافعة الكهربية المستحثة في ملف ما بدلالة كمية تسمى **التدفق المغناطيسي** . ومن أجل هذا ، ابتكر قاعدة تحدد كيفية رسم خريطة لخطوط المجال المغناطيسي . فإذا كان للمجال المغناطيسي في منطقة ما مقدار هو B فإننا نمثل هذا المقدار بيانيًا بأن نتفق على رسم خطوط المجال وهي على أبعاد معينة من بعضها البعض ، وأن تمثل المجالات الأضعف بخطوط متباعدة عن بعضها البعض بشكل أكبر . وبعبارة أخرى يمكن القول بأن **كثافة** خطوط المجال في الرسم تتناسب مع قيمة B .

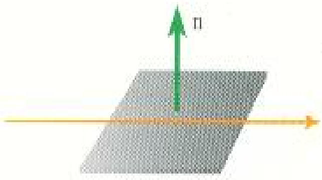
ويمكننا قياس كثافة الخطوط هذه لو أقمنا سطحًا متعامدًا مع الخطوط ثم قمنا بعد الخطوط التي تخترق وحدة المساحات من هذا السطح ؛ كما في الشكل 3-20 ، حيث يمر ستة عشر خطًا من خطوط المجال خلال مساحة قدرها $1\ m^2$. وقد نود أن نختار كثافة الخطوط هذه لتمثل شدة مجال مغناطيسي ولتكن $1\ T$ مثلاً . ومن ثم فإن منطقة تمر بوحدة المساحات بها ثمانية خطوط ستمثل شدة مجال مقدارها النصف أي $0.5\ T$ ، أما المنطقة التي بها 32 خطًا في المتر المربع فإنها تمثل مجالا شدته $2\ T$ وهكذا . أي أن التمثيل البياني للمجال المغناطيسي هو أن B تتناسب مع كثافة خطوط الفيض ، أو مع عدد خطوط المجال التي تعبر مساحة ما مقسوما على تلك المساحة .

ويؤدي هذا التفسير إلى اعتبار أن عدد الخطوط المارة خلال المسافة A يمثل المقدار $B_\perp A$. وهذا هو ما يسمى **الفيض (التدفق) المغناطيسي** خلال A ، وعادة ما يعبر عنه بالرمز Φ :

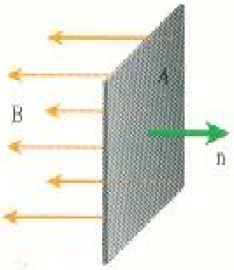
$$B_\perp A = \Phi = \text{الفيض المغناطيسي خلال } A \qquad (20\text{-}1)$$



(أ) الفيض = BA



(ب) الفيض = 0



(جـ) الفيض = $-BA$

شكل 4-20:
يعتمد الفيض خلال مساحة ما على الاتجاهات النسبية بين المساحة وخطوط المجال .

ومن الواضح أن وحدات SI للفيض المغناطيسي ستكون $T.m^2$ وتختصر هذه الوحدة في اسم خاص هو الويبر **weber (Wb)** . وهكذا .

$$1\ Wb = 1\ T.m^2$$

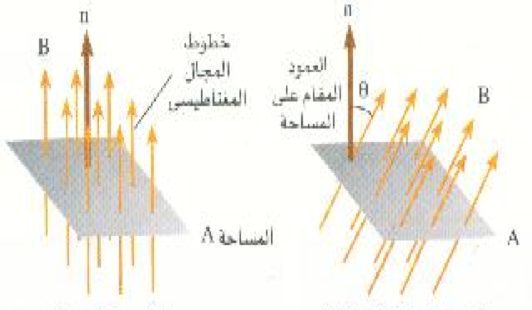
أو بدلاً من ذلك $$1\ T = 1\ Wb/m^2$$

وبسبب هذا التعبير الأخير فإن المجال المغناطيسي B يشار إليه أحيانًا بأنه **كثافة الفيض** (التدفق) .

ومن المهم جدا تذكر أننا اعتبرنا **B** متعامدًا مع مستوى المساحة A فى الشكل 4-20 (أ) فإذا أدرنا المساحة A كما فى الشكل 4-20 (ب) فإنه لن تمر خلالها أية خطوط للمجال ولهذا فإن $\Phi = 0$. وقد يكون الفيض سالبًا كذلك كما هو موضح فى الشكل 4-20 (جـ) حيث يتخذ كل من **B** و **n** اتجاهين متضادين وهناك طريقة بسيطة لكتابة هذه العلاقة بين Φ والاتجاه وذلك بوصف اتجاه **العمود n** ، المقام على المساحة A . والمركبة $B_{\perp} = B\cos\theta$ هى مركبة **B** الموازية للعمود . وعلى هذا تكون المعادلة العامة للفيض المغناطيسى هى :

$$\Phi = (B\cos\theta)A = BA\cos\theta \qquad (20\text{-}2)$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين **B** و **n** .



(a) $\theta = 0; \Phi = BA$ (b) $\theta \neq 0; \Phi = BA\cos\theta$

شكل 5-20:
يكون الفيض Φ خلال مساحة ما A هو حاصل ضرب A فى مركبة المجال المغناطيسى B الموازية للعمود المقام على المساحة ، n . ولهذا فإن $\Phi = (B\cos\theta)A$ ، حيث θ هى الزاوية المحصورة بين B و n .

مثال 1-20

تبلغ قيمة المجال المغناطيسى 4.0×10^{-5} T فى إحدى الغرف ، وتميل بزاوية مقدارها 70° أسفل الخط الأفقى . أوجد قيمة الفيض خلال سطح منضدة مساحتها $400 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ موضوعة فى الغرفة .

استدلال منطقى :

أ

سؤال : ما الذى يحدد قيمة الفيض ؟

الإجابة : إنها شدة المجال B والمساحة A والزاوية المحصورة بين **B** والعمود المقام على المساحة : $\Phi = BA\cos\theta$.

سؤال : ما هى الزاوية الصحيحة التى تستخدم ؟

الإجابة : العمود المقام على سطح المنضدة يكون رأسيًا . وحيث أن **B** يتجه بزاوية 70° أسفل الخط الأفقى ، فإنه يكون على زاوية 20° من الرأسى (ويتجه إلى أسفل) .

الحل والمناقشة : المساحة A هى

$$A = (4.00 \text{ m})(0.80 \text{ m}) = 3.2 \text{ m}^2$$

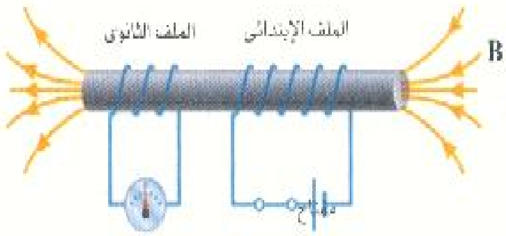
ويكون الفيض هو

$$\Phi = (4.0 \times 10^{-5} \text{ T})(3.2 \text{ m}^2)\cos 20^\circ = 1.2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

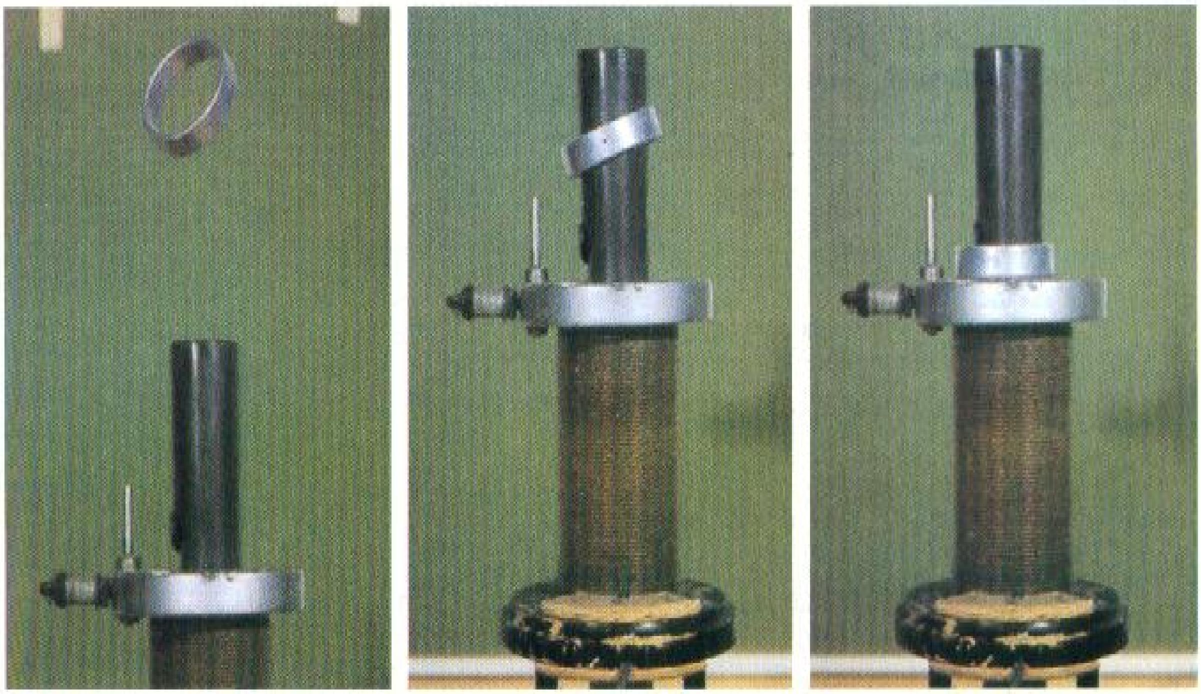
تمرين : ما مقدار الفيض الذى يمر خلال الحائط الشمالى للغرفة والذى مساحته $18\ m^2$ ، إذا لم يكن للمجال مركبة فى الاتجاه غرب شرق ؟ **الإجابة :** $2.1 \times 10^{-4}\ Wb$.

20-3 قانون فاراداى وقانون لنز

أجرى فاراداى العديد من التجارب كتلك الموضحة فى الشكلين 1-20 ، 2-20 ، ثم استنتج بعدها أن القوة الدافعة الكهربية المستحثة تتواجد فقط عندما يتغير الفيض المغناطيسى الذى يتخلل الملف . وكمثال آخر ، سنفحص التجربة الموضحة فى الشكل 6-20 .



شكل 6-20: ماذا يحدث فى الملف الثانوى عندما يكون التيار المار فى الملف الإبتدائى ثابتًا ؟ وماذا يحدث عندما يفتح المفتاح ؟ وعندما يضغط عليه ليقفل ؟



(أ) (ب) (جـ)

أثر من آثار الحث المغناطيسى . (أ) تستقر حلقة صغيرة من الألمونيوم فوق طوق أكبر من الألمونيوم أعلى ملف لولبى . والعمود الأسود فى الصورة مصنوع من مادة فرومغناطيسية . عند وصول التيار إلى الملف فإن مجاله المغناطيسى المتغير يخلق فيضًا مغناطيسيًا متغيرًا فى حلقة الألمونيوم . وتكون النتيجة المعارضة لهذه الزيادة فى الفيض ، أن يستحث تيار فى الحلقة من شأنه المرور فى اتجاه عكس اتجاه التيار فى الملف اللولبى . وفى (ب) و (جـ) يبدو تأثير قوة التنافر بين هذين التيارين المتعاكسين .

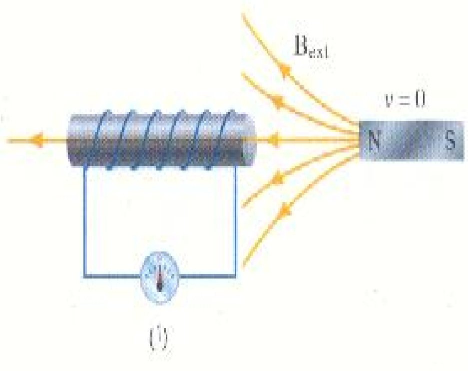
عندما يضغط المفتاح ليقفل فإن التيار المار فى الملف الابتدائى يخلق المجال المغناطيسى المبين بالشكل . وبما أن خطوط المجال ستتخذ القضيب الحديدى مسارًا ، فإن فيضًا كبيرًا يمر خلال الملف الثانوى . أما إذا جذب المفتاح ليفتح فإن هذا الفيض يتناقص حتى يصبح صفرًا لأن التيار الذى يتسبب فيه قد توقف . أى أن القوة الدافعة الكهربية المستحثة فى الملف الثانوى لا توجد بالفعل إلا عند حدوث هذا **التغير** فى الفيض ؛ ولن تكون هناك أية قوة دافعة مستحثة عندما لا يكون الفيض فى حالة تغير . وتدل نبضة التيار المسجلة فى الجلفانومتر على وجود قوة دافعة كهربية مستحثة فى الملف الثانوى . (الشكل 6-20) .

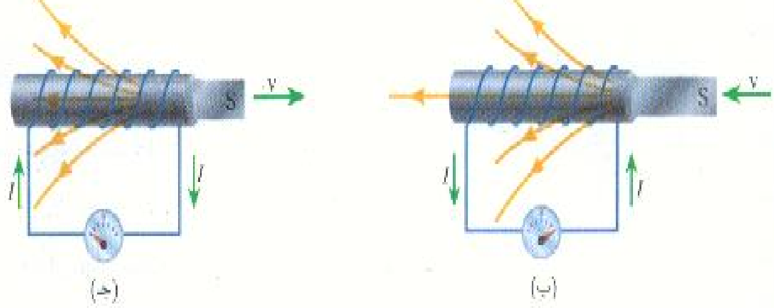
وبالمثل ، فإننا لو بدأنا التجربة والمفتاح مفتوح ، فإن الفيض خلال الملف الثانوى يكون صفرًا . فإذا ضغط المفتاح ليقفل فستمر برهة قصيرة من الزمن يتنامى فيها الفيض حتى يصل إلى قيمته المناظرة لحالة الاستقرار . ومرة أخرى يُرصد تيار فى الملف الثانوى أثناء هذه البرهة . ويكون التيار هذه المرة فى عكس اتجاه التيار الذى مر عندما جذب المفتاح ليفتح . وبمجرد أن يصل التيار إلى القيمة المناظرة لحالة الاستقرار فإن القوة الدافعة الكهربية فى الملف الثانوى تختفى . . لأن الفيض المغناطيسى الذى يتخلل الملف الثانوى قد صار مرة أخرى ثابتًا لا يتغير .

وتؤكد التجربة المبينة فى الشكل 7-20 استنتاج فاراداى . فيلاحظ أنه لكون خطوط المجال أكثر كثافة بالقرب من المغناطيس ، لذا ينمو الفيض المتخلل للملف مع اقتراب المغناطيس أكثر فأكثر . ويظل هناك تيار فى الملف طالما ظل المغناطيس متحركًا نحو الملف وعندما يصبح المغناطيس ساكنًا فلن يكون هناك تغير فى الفيض وبالتالى لا يستحث تيار فى الملف . وعندما يسحب الملف كما فى الشكل 7-20 فإن الفيض يأخذ فى **التناقص** . ويسجل الجلفانومتر تيارًا فى الاتجاه المضاد . ويدل اتجاها التيار على أن قطبية القوة الدافعة الكهربية المستحثة عند اقتراب المغناطيس ؛ تكون عكس تلك التى تحدث عند تراجع المغناطيس وتباعده . وهذا ما يوضحه الشكل 7-20 (ب) و (جـ) .

ونستطيع الآن أن نقدم صياغة كمية لنتائج فاراداى . نفترض أن الفيض المغناطيسى الذى يتخلل ملفًا به عدد N عروة ؛ يتغير من Φ_1 إلى Φ_2 فى زمن قدره Δt . وقد وجد فاراداى أن متوسط القوة الدافعة الكهربية المستحثة فى الملف خلال هذا التغير هى

$$\text{(20-3)} \qquad \overline{\text{القوة الدافعة الكهربية (ق.د.ك)}} = N\frac{(\Phi_2 - \Phi_1)}{\Delta t} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$





شكل 7-20:
عندما يتحرك المغناطيس كما فى الجزء (ب) ، (جـ) فإن التيار المستحث يتجه كما فى الرسم . لماذا ؟

وهو ما يطلق عليه **قانون فاراداى للحث المغناطيسى** . وهو أحد أكثر مبادئ الكهربية

والمغناطيسية أهمية ، بل ويعتبر أساس عمل المولدات الكهربائية والمحركات وعدد كبير من الأجهزة المهمة .

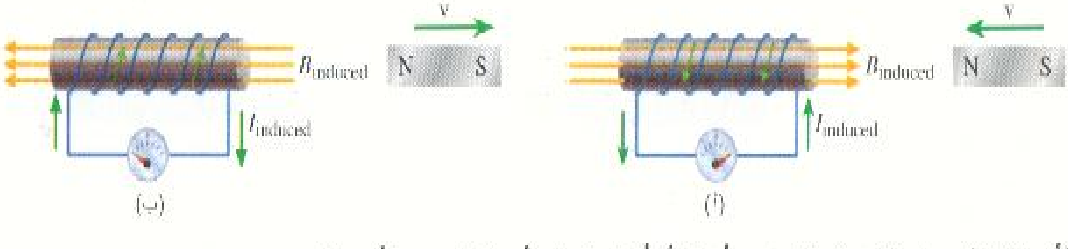
وكما هو شأن أى تيار آخر فإن التيار المستحث ينتج مجالاً مغناطيسيًا خاصًا به . والشكل 8-20 يبين اتجاهات هذا المجال المستحث (B_{ind}) والناشئ من تحركات المغناطيسين المرسومين في الأشكال (ب) و (جـ) وعليك التأكد من أن الاتجاهات المبينة للمجال (B_{ind}) فى الشكل 8-20 تتفق مع قاعدة اليد اليمنى .

ومن المهم عند هذه النقطة أن ندرك أن الفيض المغناطيسى Φ يمكن أن يكون موجبًا أو سالبًا ، اعتمادًا على ما إذا كانت الزاوية θ المحصورة بين **B** و **n** تقع بين $0°$ و $90°$ (الشكل 4-20 أ يبين زاوية مقدارها $0°$) أو بين $90°$ و $180°$ (الشكل 4-20 جـ يبين زاوية مقدارها $180°$) . وبعبارة أخرى ، إذا انعكس اتجاه المجال المغناطيسى خلال مساحة ما فإن إشارة Φ تنعكس هى الأخرى . وفيما يأتى من مناقشة سنعتبر أن العمود المقام على مستوى الملف والمغناطيس الخارجي يقعان بطول محور x . وعلى هذا يكون الفيض موجبًا إذا كان للمجال المغناطيسي مركبة في الاتجاه $+x$ ، وسالبًا عندما تكون المركبة في الاتجاه $-x$.

وفى الحالات التى يغطيها الشكلان 7-20 ، 8-20 ، هناك **مصدران** للمجال المغناطيسي ومن ثم مصدران للفيض المغناطيسي الذى يتخلل الملف فمصدر الفيض Φ_{ext} هو مجال المغناطيس (B_{ext}) ، ومصدر الفيض Φ_{int} هو المجال المغناطيسى (B_{int}) الذى ينتجه التيار المستحث . يلاحظ فى الشكل 7-20 (ب) أن المجال B_{ext} يتجه نحو اليسار ولذا يكون سالبًا . وعندما يقترب فإن مزيدًا من خطوط B_{ext} تخترق مستوى الملف ، ومن ثم يزداد هذا الفيض السالب .

أما فى الشكل 7-20 (جـ) فإن المجال المغناطيسى الخارجي الذى يخلق الفيض Φ_{ext} يتجه أيضًا نحو اليسار ؛ ولذلك يكون Φ_{ext} سالبًا هو الآخر . إلا أن هذا الفيض السالب خلال الملف يتناقص لأن المغناطيس يتحرك مبتعدًا عن الملف . ويوضح الشكل 8-20 (ب) أن المجال المغناطيسى المستحث B_{ind} الناشئ عن التيار المستحث سيتجه الآن نحو اليسار ، لذا فإن Φ_{ind} الناتج عن هذا المجال يكون سالبًا . وهذا الفيض السالب Φ_{ind} يعوّض بعضًا من الفيض Φ_{ext} الذى أزيل عند تراجع المغناطيس . وهكذا - ومرة أخرى - فإن الفيض المستحث يعارض التغير الحادث فى الفيض الخارجي .

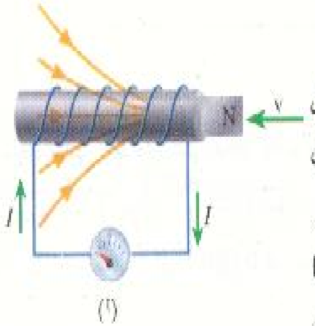
شكل 8-20: يخلق التيار المستحث فيضًا مغناطيسيًا يتخلل الملف ، بحيث يعارض التغير فى الفيض الناتج عن مجال خارجى متغير (ليس مبينًا هنا) . (أ) عند اقتراب القطب الشمالى من الملف ، كما فى الشكل 7-20 (ب) . (ب) بتراجع القطب الشمالى كما فى الشكل 7-20 (جـ) .



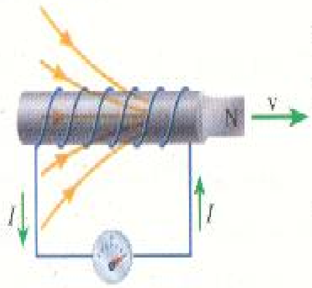
والأمر المشترك بين هاتين الحالتين هو أن تيارًا يُستحث فى أى اتجاه من شأنه خلق فيض مستحث يعارض التغير فى الفيض الخارجى الناشئ عن B_{ext} . أى أن ، **الفيض المستحث يميل إلى المحافظة على ظروف الفيض الأصلى** . وقد اتضح أن هذه الملاحظة

تعتبر مبدأً عامًا وتسمى **قانون لنز** :

يستحدث التغير فى الفيض المغناطيسى الخارجى Φ_{ext} خلال الملف قوة دافعة كهربية (ق.د.ك) فى الملف . ويكون اتجاه التيار الذى تحدثه هذه القوة الدافعة الكهربية بحيث ينتج المجال المغناطيسى الذى يخلقه B_{ind} فيضًا Φ_{ind} يعارض التغير الحادث فى Φ_{ext} .



(أ)



(ب)

شكل 20-9:
يستحدث قطب مغناطيسى جنوبى يقترب أو يتراجع عن ملف تيارات تعاكس تلك التى تحدث بالنسبة لقطب شمالى . قارن الرسومات الموضحة بالشكل بتلك التى فى الأشكال 20-7 (ب) ، (جـ) .

وكمثال إضافى ، افترض إنك قربت قطبًا **جنوبيًا** لمغناطيس من ملف كما فى الشكل 20-9 (أ) . وفى هذه الحالة يتجه المجال B_{ext} **نحو اليمين** ، ويكون Φ_{ext} خلال الملف موجبًا . ويتزايد كلما اقترب المغناطيس . وإذا طبقت قاعدة لنز فستكون قادرًا على إثبات أن اتجاه I_{ind} الآن سيكون كما هو موضح فى الشكل 20-8 (ب) . ويستحث هذا التيار مجالاً مغناطيسيًا B_{ind} يتجه إلى اليسار ولذا فإن Φ_{ind} الذى يخلقه هذا المجال يكون سالبًا . ويلغى هذا الفيض السالب بعضًا من الزيادة الحادثة فى Φ_{ext} الموجب والتى تحدث نتيجة حركة المغناطيس . ومرة أخرى ، وكما ينبغى ، **فإن الفيض المستحث يعارض التغير الحادث فى الفيض الخارجى .**

ولابد أن تحليلاً موازيًا للشكل 20-9 (ب) سوف يقنعك أن المجال المغناطيسى المستحث يتجه فى هذه الحالة كما هو مبين فى الشكل 20-8 (أ) .

ويمكن تبسيط استخدام قانون لنز لإيجاد اتجاه التيار المستحث لو أنك تذكرت الخطوات التالية :

1 عين اتجاه المجال المغناطيسى الخارجى المار خلال العروة . فإذا ما عرفت اتجاه B_{ext} فإنك ستعرف إشارة Φ_{ext} . فإذا كانت مركبة B_{ext} فى اتجاه x الموجب فيمكنك اعتبار Φ_{ext} موجبًا ، وبالنسبة لمركبة B_{ext} فى الاتجاه x السالب . اعتبر Φ_{ext} سالبًا .

2 حدد ما إذا كان B_{ext} فى تناقص أو تزايد .

3 حدد الإشارة التى لابد أن تكون لدى Φ_{ind} حتى يعارض التغير فى Φ_{ext} الناشئ عن التغير الحادث فى B_{ext} . (تذكر أنه ليس من الضرورى أن يعارض الفيض المستحث الفيض الخارجى ولكنه دائمًا ما يعارض **التغيرات** فى ذلك الفيض) .

4 حدد الاتجاه الذى على B_{ind} أن يتخذه لكى ينتج Φ_{ind} الذى له الإشارة المحددة فى الخطوة 3 .

5 حدد (من قاعدة اليد اليمنى) الاتجاه الذى يجب أن يتخذه التيار المستحث لكى يحدث اتجاه B_{ind} المحدد فى الخطوة 4 .

ولقد ناقشنا حتى الآن - التغيرات الناتجة عن التغيرات فى المجال المغناطيسى المار خلال الملف . على أنه لابد من تذكر أن الفيض يعتمد أيضًا على مساحة الملف واتجاهه بالنسبة للمجال . وهكذا فإن الفيض خلال الملف يمكن أن يتغير بإحدى الوسائل التالية :

1 بتغيرات فى B .

2 بتغيرات فى المساحة A .

3 بتغيرات فى الزاوية θ .

وقد ثبت أن قانونى فاراداى ولنز صالحان بغض النظر عن الكيفية التى يتغير بـها الفيـض . وسـوف نطبق ـ فـى فصول تالية ـ هـذين القانونين على حالات يتغير فيها كل مـن المساحة والاتجاه .

مثال 2-20

لدينا ملف لولبى يحتوى على 100 لفة ومساحة مقطعه المستعرض $4.0\ cm^2$. وقد نقل الملف فجأة من منطقة لا يوجد بها مجال مغناطيسى إلى أخرى بـها مجـال 0.5 T يتجـه بطـول الملف . فإذا استغرق النقل 0.020 s فما مقدار ق.د.ك المتوسطة المستحثة فى الملف اللولبى ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يحدد ق.د.ك المستحثة ؟

الإجابة : إنه قانون فاراداى : $\overline{\text{ق.د.ك}} = -N.(\Delta\Phi/\Delta t)$.

سؤال : ما الذى يجعل الفيض يتغير ؟

الإجابة : إن التعبير العام للفيض هو $\Phi = AB\cos\theta$. حيث $\theta = 0$ فى هذه الحالـة . وبما أن A هى المساحة الثابتة للملف اللولبى ، فـإن التغير فـى B هـو الـذى يجعـل الفيض يتغير .

سؤال : ما هو $\Delta\Phi$ ؟

الإجابة : $\Delta\Phi = (B_2 - B_1)A$ حيث $B_1 = 0$ فى هذه الحالة .

الحل والمناقشة : والمناقشة :

$$\Delta\Phi = (0.50\ T)\,(4.0\times10^{-4}\ m^2) = 2.0\times10^{-4}\ Wb$$

و ق.د.ك المتوسطة المستحثة هى

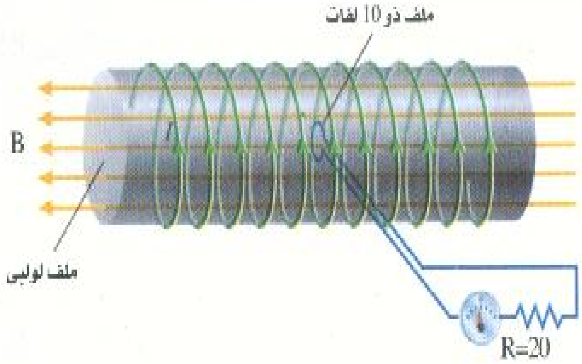
$$\overline{\text{ق.د.ك}} = \frac{(100\ \text{لفة})(2.0\times10^{-4}\ Wb)}{0.020\ s} = 1.0\ V$$

إذا رجعت إلى تعريف وحدة تسلا ، فلابد أنك ستسـتطيع إثبـات أن ويـبر فـى الثانيـة Wbs^{-1} تناظر V (فولت) .

مثال 3-20

يوضح الشكل 10-20 ملفًا صغيرًا به عشر لفات 10 turns ونصف قطره $r = 5.00\ cm$ وقد أدخل هذا الملف فى ملـف لولبـى بحيـث كـان محوراهما متوازيـين . وكـان الملـف متصلاً فى دائرة تحتوى على جلفانومتر ومقاومـة مقدارهـا $R = 20.0\ \Omega$ ، أما الملـف اللولبى فيحتوى على 2000 لفة لكـل متر من طولـه ويحمـل تيـارًا مقداره 15 A فـى الاتجاه المبين بالشكل . وعندما يفتح المفتاح المتصل بمصدر تيار الملف اللولبى فإن تيار

الملف اللولبى يصل إلى الصفر فى 30.0 ms . (أ) ما هو متوسط التيار المار خلال الجلفانومتر ؟ (ب) ما هو اتجاه هذا التيار ؟



شكل 10–20:
عندما يتغير التيار فى الملف اللولبى فإن تيارًا يسرى فى الجلفانومتر . لماذا ؟

1

استدلال منطقى الجزء (أ) :

سؤال : لماذا سيمر تيار خلال الجلفانومتر ؟

الإجابة : لأن المجال المغناطيسى الأصلى للملف اللولبى سيضمحل إلى الصفر عندما يقطع التيار . ويتسبب بعض هذا المجال فى وجود فيض مغناطيسى خلال الملف ذى اللفات العشر 10 turn . ومع تناقص مجال الملف اللولبى فإن الفيض يتغير مع الزمن بحيث يستحث تيارًا فى الملف .

سؤال : ما الذى يحدد مقدار التيار المتوسط المستحث ؟

الإجابة : يستحث معدل تغير الفيض ق.د.ك متوسطة فى الملف :

$$\overline{\text{ق.د.ك}} = -N_{\text{ملف}}(\Delta\Phi_{\text{ملف}}/\Delta t)$$

ويتحدد التيار المتوسط من قانون أوم : $\overline{I} = \dfrac{\overline{\text{ق.د.ك}}}{R}$

سؤال : ما هو الفيض الأصلى فى الملف الصغير ؟

الإجابة : القيمة الأصلية للمجال هى B_1 فى الملف اللولبى . ولذا فإن

$$\Phi_1 = B_1 A_{\text{ملف}} = B_1 \pi r^2$$

سؤال : ما هى معادلة B_1 ؟

الإجابة : من المعادلة 11–19 نجد أن $B_1 = \mu_0 n I_1$ ، حيث $n = 2000/\text{m}$ و $I_1 = 15.0\ \text{A}$.

الحل والمناقشة : التغير فى الفيض هو

$$\Delta\Phi = 0 - \Phi_1 = -(\mu_0 n I_1)(\pi r^2)$$

$$= -(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T.m/A})(2000/\text{m})(15.0\ \text{A})\pi(0.0500\ \text{m})^2$$

$$= -2.96 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$$

يمكننا الآن تجاهل الإشارة السالبة ، فهى مجرد دليل على أن الفيض فى تناقص . وسنفحص اتجاه التغير فى الجزء (ب) . أما مقدار متوسط ق.د.ك المستحثة فهو :

$$\overline{\text{emf}}\ (\text{ق.د.ك}) = (10\ \text{turns})\,(2.96\times10^{-4}\ \text{Wb})\,/\,(30.0\times10^{-3}\ \text{s}) = 9.87\times10^{-2}\ \text{V}$$

أما التيار المتوسط المستحث فهو

$$\overline{I} = \frac{\overline{\text{emf}}}{R} = \frac{9.87\times10^{-2}\ \text{V}}{20.0\ \Omega} = 4.93\ \text{mA}$$

استدلال منطقى الجزء (ب) :

سؤال : ما هو اتجاه المجال الأصلى المار خلال الملف ؟

الإجابة : باستعمال قاعدة اليد اليمنى ، يمكن إثبات أن المجال المغناطيسى الناشئ عن تيار الملف اللولبى يكون متجهًا إلى اليسار فى الشكل 10–20 .

سؤال : عند فتح المفتاح ، هل يزيد المجال فى هذا الاتجاه أم ينقص ؟

الإجابة : ينقص .

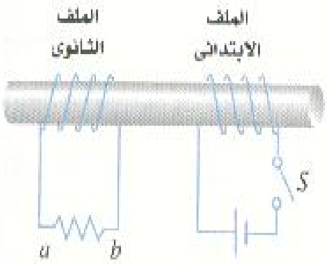
سؤال : فى أى اتجاه يقوم المجال المستحث من الملف الصغير بمعارضة التغير الحادث فى الفيض ؟

الإجابة : إذا كان الملف ينتج مجالاً مغناطيسيًا يتجه يسارًا ، فإن الفيض الذى ينشؤه هذا المجال سيعادل جزئيًا النقص الحادث فى فيض الملف اللولبى .

سؤال : ما هو اتجاه التيار فى الملف الصغير ، الذى يخلق مجالاً مغناطيسيًا إلى اليسار ؟

الإجابة : إنه التيار الذى له نفس اتجاه التيار الأصلى فى الملف اللولبى . ويكون هذا التيار المستحث فى اتجاه من اليسار إلى اليمين خلال الجلفانومتر والمقاوم فى الشكل 10–20 .

20–4 الحث المتبادل



شكل 11–20: لماذا يتجه التيار فى الملف الثانوى من a إلى b فى لحظة فتح المفتاح S ؟

ينطبق قانون فاراداى للقوة الدافعة الكهربية المستحثة فى ملف على أية طريقة من شأنها تغيير الفيض المغناطيسى خلال الملف . وسنفترض أن لدينا ملفين موضوعين جنبًا إلى جنب كما فى الشكل 11–20 ، عندما يكون المفتاح مفتوحًا ، فإن الفيض المغناطيسى سيكون صفرًا فى كليهما . وعندما يغلق المفتاح فجأة فإن الملف الابتدائى يعمل كمغناطيس كهربائى يولد فيضًا مغناطيسيًا فى المنطقة القريبة منه ، بحيث يذهب جزء من الفيض خلال الملف الثانوى . ومن ثم سيتغير الفيض الذى يتخلل الملف الثانوى عند قفل المفتاح فجأة . وطبقًا لقانون فاراداى فإن ق.د.ك مستحثة تتولد فى الملف الثانوى أثناء الفترة التى يرتفع فيها التيار فى الملف الابتدائى من الصفر وحتى قيمته النهائية ولابد أنك قادر على إثبات أن اتجاه التيار المستحث خلال المقاوم فى الشكل 11–20 سيكون من b إلى a بمجرد قفل المفتاح . . ويكون فى عكس الاتجاه بمجرد فتحه .

وتعتمد قيمة ق.د.ك المستحثة فى الثانوى على كثير من العوامل الهندسية ، ومنها عدد لفات السلك فى كل ملف ، ومدى قرب الملفين من بعضهما البعض واتجاه كل منهما بالنسبة للآخر . ومساحة المقطع المستعرض لكل منهما . (لماذا ؟) وبالإضافة إلى

ذلك بما أن الفيض خلال الثانوى سيتناسب مع التيار المار فى الملف الابتدائى فإن ق.د.ك المستحثة فى الثانوى ستتناسب مع معدل تغير التيار فى الابتدائى $\Delta I_p / \Delta t$. ومن ثم نستطيع كتابة المعادلة التالية للقوة الدافعة الكهربية المستحثة فى الثانوى :

$$\text{emf}_{sec} = -M\frac{\Delta I_p}{\Delta t} \quad (\text{ق.د.ك}_{\text{ثانوى}}) \tag{20-4}$$

حيث يحتوى ثابت التناسب M على تأثيرات هندسة كل من الملفين . وتسمى M **المحاثة التبادلة** للملفين . فإذا كانت وحدات ق.د.ك هى الفولت والتيار I بالأمبير والزمن t بالثانية فإن وحدة المحاثة M تُعرف على أنها **هنرى** (H) أو V . s/A .

وفى النهاية فإن من الطرق المهمة لزيادة المحاثة التبادلة ، ما تتضمن ربط الملفين بواسطة قلب من مادة فرومغناطيسية كالحديد . ونظرًا للقيمة الكبيرة للإنفاذية المغناطيسية النسبية K_m (القسم 14-19) فإن المجال الذى ينشؤه تيار معين فى الابتدائى سيزداد بشكل هائل مقارنًا بقيمته فى عدم وجود القلب الحديدى . ويزيد هذا بدوره الفيض المغناطيسى الذى يربط الملفين معًا زيادة كبيرة عند أى تيار فى الملف الابتدائى . وعندما يبدأ تغير الملف الابتدائى ، فإن الفيض يتغير وتظهر ق.د.ك مستحثة فى الثانوى . . وتكون أكبر نسبيًا من الحالة التى يخلو فيها الملف من قلب حديدى . ويؤدى هذا إلى قيمة كبيرة للمحاثة المتبادلة ، كما هو واضح من تعريف M فى المعادلة 4-20 .

مثال توضيحى 1-20

لدينا ملفان من السلك ملفوفان حول قلب حديدى ولهما محاثة متبادلة مقدارها 0.50 H . ما مقدار ق.د.ك المتوسطة التى تتولد فى الثانوى عندما يرتفع التيار فى الابتدائى من 2.0 A إلى 3.0 A فى 0.010 s ؟

استدلال منطقى : من المعادلة 4-20

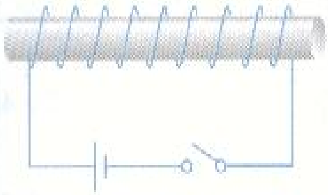
$$\text{ق.د.ك} = \frac{(0.50\ \text{H})(3.0\ \text{A} - 2.0\ \text{A})}{0.010\ \text{s}} = 50\ \text{V}$$

تذكر أن ق.د.ك تستحث فقط أثناء هذه الفترة القصيرة (0.010 s) التى يتغير فيها التيار الابتدائى . وبمجرد أن يصبح التيار مستقرًا فإن الفيض الذى يربط الملفين لن يعود متغيرًا ، و ق.د.ك لن تعود مستحثة .

5-20 المحاثة الذاتية

ينص قانون فاراداى على أن أى تغير فى الفيض المغناطيسى خلال ملف ما يستحث ق.د.ك فى الملف . ويخلق الملف المعزول حامل التيار مجالاً مغناطيسيًا يمر فيضه خلال مستوى الملف . ويستتبع هذا ، أنه عندما يتغير التيار المار فى الملف فإن الفيض الذى يمر

خلاله يتغير أيضًا ولـهذا كلما طرأ تغير على التيار فى الملف فإن ق.د.ك **تستحث ذاتيًا** فى الملف طالما كان التغير مستمرًا .



شكل 12-20:
عند قفل المفتاح أولاً ، فإن الملف يستحث ق.د.ك داخل نفسه . فهل تعضد هذه القوة الدافعة الكهربية البطارية أم تعاكسها ؟

لنفرض أن التيار الموضح فى الشكل 12-20 يتغير من الصفر إلى قيمة نهائية عند قفل المفتاح أولاً . ويتولد عن التيار المتنامى مجال مغناطيسى آخذ فى الزيادة ويتجه يسارًا خلال الملف . وطبقًا لقانون فاراداى تستحث ق.د.ك فى الملف وتحاول أن تهيئ مجالاً معاكسًا يتجه إلى اليمين خلال الملف . ومن ثم يصبح على ق.د.ك المستحثة أن تكون معاكسة للقوة الدافعة الكهربية للبطارية . على أن المفتاح إذا فتح فجأة فإن ق.د.ك المستحثة سوف تعضد البطارية بدلاً من أن تعاكسها . (لابد إنك تستطيع إثبات ذلك) .

وسيكون معدل تغير الفيض المغناطيسى خلال الملف متناسبًا مع معدل تغير التيار فى الملف . فإذا كان $\Delta I/\Delta t$ هو معدل تغير التيار خلال الملف ، فإننا نستطيع كتابة متوسط ق.د.ك المستحثة هو

$$\overline{(\text{ق.د.ك})} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad (20\text{-}5)$$

ويسمى ثابت التناسب L **المحاثة الذاتية** للملف . وهى تعتمد على هندسة الملف وعلى مادة القلب التى يلتف حولها السلك . ووحدات L هى نفسها وحدات المحاثة المتبادلة أى هنرى .

إذا كان الملف ملفوفًا حول قلب حديدى فإن الفيض خلاله سيكون أكبر بكثير عما لو كان القلب مصنوعًا من مادة غير فرومغناطيسية . ومن ثم فإذا كان المطلوب محاثة ذاتية كبيرة فلابد أن يكون ملف المحاثة ملفوفًا حول قلب حديدى . وسوف نعود للمحاثة المتبادلة والذاتية فى فصول لاحقة ؛ لأنها ذات أهمية خاصة فى دوائر التيار المتردد ، حيث يكون التيار ومن ثم الفيض فى تغير مستمر .

مثال 20-4 :

لديك ملف لولبى مساحة مقطعه المستعرض A وطوله l وعدد اللفات به n لوحدة الأطوال . ما هى محاثته الذاتية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو تعريف المحاثة الذاتية ؟

الإجابة : تفيد المعادلة 20-5 أن L ليست سوى ثابت التناسب بين ق.د.ك المستحثة ذاتيًا ومعدل تغير التيار :

$$L = \frac{\text{emf}}{\Delta I/\Delta t}$$

سؤال : على أى مقادير تعتمد ق.د.ك المستحثة .

الإجابة : ينطبق قانون فاراداى دائمًا :

$$\text{emf} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

وفى هذه الحالة فإن Φ هو الفيض خلال الملف اللولبى الذى يخلقه مجال نفس الملف .

سؤال : ما هو الفيض الذاتى لملف لولبى ؟

الإجابة : طبقًا للمعادلة 11-19 فإن مجال الملف اللولبى الهوائى هو

$$B = \mu_0 nI = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

وبما أن المجال منتظم خلال باطن الملف ، فإن فيضه هو ببساطة

$$\Phi = BA = \frac{\mu_0 NI}{l}\text{A}$$

سؤال : ما هو التغير الطارئ فى الفيض عند تغير التيار ؟

الإجابة : إن كل الكميات الواردة بالمعادلة فيما عدا التيار هى كميات ثابتة . ولهذا فإن $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ لابد أن يتناسب مع $\frac{\Delta I}{\Delta t}$:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\mu_0 NA}{l}\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تحدد emf (ق.د.ك) والتى سأحصل عليها بالتعويض عن هذه النتيجة فى قانون فاراداى ؟

الإجابة :
$$\text{emf} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\mu_0 NA}{l}\frac{\Delta I}{\Delta t} = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

الحل والمناقشة : يمكنك عند فحص المعادلة الأخيرة أن تكتشف أنه بالنسبة للملف اللولبى :

$$L = N\frac{\mu_0 NA}{l}$$

فإذا وضعنا $n = N/l$ فيمكننا كتابة هذه العلاقة على الصورة :

$$L = \mu_0 n^2 lA$$

فلو كان قلب الملف اللولبى مملوءًا بمادة إنفاذيتها المغناطيسية النسبية هى K_m ، فإن L لابد من ضربها فى K_m .

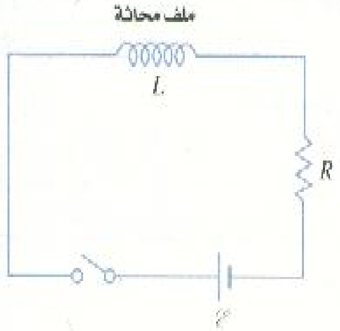
تمرين : عين قيمة L لملف به 500 لفة وقلبه هواء وطوله 80.0 cm وقطره 1.20 cm .

الإجابة : 4.44×10^{-5} H .

20-6 الدوائر المكونة من محاثة ومقاومة

سنتعرف على بعض الخواص الشيقة والمفيدة للغاية للفات المحاثة بالتفصيل في الفصل 21 . أما الآن فسنهتم بجانب واحد فقط لسلوك ملف المحاثة ـ وهو قدرته على اختزان الطاقة .

لنعتبر أولاً الدائرة الموضحة في الشكل 13-20 ، والتي تتكون من ملف محاثة (يرمز له بالرمز) ومقاومة وبطارية ومفتاح . ولو لم يكن الملف موجوداً بالدائرة لارتفع التيار في الدائرة بمجرد قفل المفتاح ولكان التيار النهائي $\mathscr{E}/R$. على أنه في وجود الملف ، فإن ارتفاع التيار سيكون مصحوبًا بتولد فيض في الملف . ويستحث هذا الفيض ق.د.ك في الملف في اتجاه من شأنه معاكسة التيار المتزايد . وبعبارة أخرى ، فإن ملف المحاثة يبدو بمثابة بطارية ذات قطبية مضادة للبطارية الحقيقية في الدائرة .



شكل 13-20:
لماذا لا ينمو التيار إلى القيمة $\mathscr{E}/R$ دفعة واحدة بعد قفل المفتاح مباشرة ؟

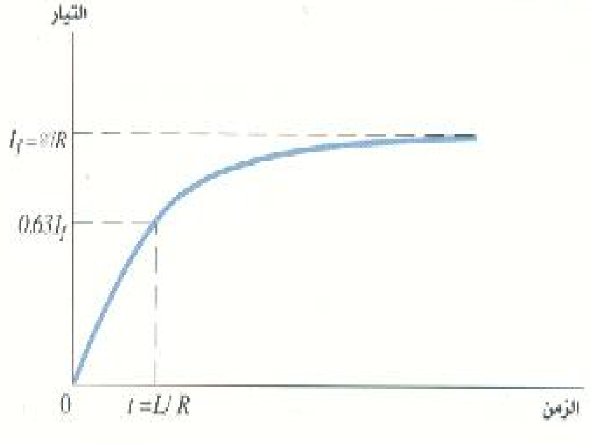
ونتيجة هذا أن تعمل محاثة الملف على خفض معدل الزيادة في تيار الدائرة . وكلما زادت قيمة L ، كلما ارتفع تأثير الملف في تأخير الزيادة في التيار . وعلى الرغم من تأثير التأخير هذا فإن التيار سيصل في النهاية إلى قيمته المستقرة التي يحددها قانون أوم ، أي $\mathscr{E}/R$. ويمكن بمساعدة حساب التفاضل والتكامل اشتقاق اعتماد التيار على الزمن عندما يغلق المفتاح في اللحظة $t = 0$. والنتيجة هي

$$I(t) = I_f\,(1 - e^{-t/(L/R)}) \qquad (20\text{-}6)$$

حيث $I_f = \mathscr{E}/R$ و $e = 2.718$ وهي أساس اللوغاريتمات الطبيعية . وقد تستغرق بعض الوقت في فحص سلوك هذه المعادلة . وستعينك الآلة الحاسبة الصغيرة لديك ، إذ أن فيها أحد الأزرار وعليه علامة « e » مرفوعة لأي أس .

ويوضح الشكل 14-20 رسمًا بيانيًا لسلوك المعادلة (6-20) . ولابد أنك تستطيع إثبات أن المعادلة (6-20) تعطى $I = 0$ إذا كانت $t = 0$. (تذكر أن أي رقم مرفوع للأس صفر سيساوي واحدًا صحيحًا) . والمقدار L/R في أس e له وحدات زمن . وعليك إثبات ذلك .

ويسمى هذا المقدار **الثابت الزمني الحثي** τ_L للدائرة . وستجد عند استعمال الآلة الحاسبة أنه عند $t = L/R = \tau$ ،



شكل 14-20:
ينمو التيار بالشكل المبين هنا بعد قفل المفتاح في الدائرة المبينة في الشكل 13-20 .

$$I(t-\tau_L) = I_f(1-e^{-1}) = I_f\left(1-\frac{1}{2.718}\right) = 0.63\, I_f$$

ويوضح الشكل 14–20 هذه النقطة على الرسم البيانى للتيار I مع t أما عند $t = 2\tau_L$ ،

$$I = I_f(1-e^{-2}) = 0.865\, I_f$$

وكلما كان الثابت الزمنى L/R كبيرًا ، كلما كان ارتفاع التيار أكثر بطئًا فـى الوصـول إلى القيمة النهائية . وسنحسب الآن مقدار الشغل المبذول فى مواجهة ق.د.ك المعاكسة بالملف .

لقد وجدنا من المعادلة (5–20) أن ق.د.ك المستحثة فى الملف هى $L(\Delta I/\Delta t)$. ومـن ثم ، فإنه عند وجود تيار بالملف ، ستتحرك الشحنات تحت تأثير فرق للجـهد مقداره $L(\Delta I/\Delta t)$. والشغل الذى يبذلـه التيـار عنـد حملـه لشحنـة Δq خـلال ملـف المحاثـة ووجود فرق للجهد مقداره $L(\Delta I/\Delta t)$ ، هو من المعادلة 2–17 :

$$\Delta W = (\Delta q)\,(V) = (\Delta q)\left(L\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$$

ويمكن تبسيط هذه المعادلة إذا لاحظنا أن $\Delta q/\Delta t$ هى ببساطة I . وإذن

$$\Delta W = LI\Delta I$$

وفى الخلاصة فإن هذا الشغل ضرورى لزيادة التيار من القيمة I إلى $I + \Delta I$.

وعلينا الآن أن نجمع الكميات الصغيرة من الشغل المبذول مع زيادة التيار فى الدائرة بدءًا من الصفر إلى قيمته النهائية القصوى I_f . والنتيجة بالنسبة للشغـل المبـذول عندمـا يتغير التيار فى الملف من $I = 0$ إلى $I = I_f$ هى :

$$W = \frac{1}{2}LI_f^2$$

ويمكن اعتبار هذا الشغل على أنه طاقة مختزنة فى الملف . وهناك مثـال حـى علـى هذه الطاقة المختزنة وهى عندما يجذب المفتاح ليفتح فـى الدائـرة الموضحـة فـى الشكـل 13–20 ، إذ أن شرارة كبيرة ستقفز عبر فجـوة المفتـاح ، إذا كـانت المحاثـة كبـيرة . وبالإضافة إلى هذا فإن جهدًا كبيرًا جدًا سيستحث فى الملف فى محاولة منه فاشلة لكـى يعاكس فقدان الفيض الذى يتخلله . أى أننا قد توصلنا إلى :

إذا مر تيار I فى ملف محاثة L فإنه يكون مختزنًا لطاقة مقدارها $\frac{1}{2}LI^2$.

7–20 الطاقة فى مجال مغناطيسى

لابد أنك ستتذكر أننا قد حسبنا الطاقة المختزنة فى مجـال كـهربى وذلـك عنـد فحـص الطاقة المختزنة فى مكثف (القسم 12–17) . وسنقوم الآن بتعيين الطاقة المختزنـة فـى مجال مغناطيسى ، آخذين فى الاعتبار الطاقة المختزنة فى ملف محاثة . وسـنفترض أن ملف المحاثة هو ملف لولبى طويل . وكما رأينا فى الفصل 19 فإن المجـال المغناطيســى

محصورة بالضرورة في قلب الملف اللولبي وله قيمة منتظمة $B = \mu_0 nI$.

وقد حسبنا قيمة محاثة ملف لولبي في المثال 4-20 .

$$L = \mu_0 n^2 lA$$

حيث l هو طول الملف اللولبي وA مساحة مقطعه المستعرض . ويلاحظ ، مع ذلك أن lA هو حجم منطقة قلب الملف اللولبي . والطاقة المختزنة داخل الملف اللولبي هي

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 I^2 lA$$

ومنها نجد أن الطاقة لوحدة الحجوم هي :

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{\frac{1}{2}\mu_0 n^2 I^2 lA}{lA} = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 I^2$$

على أن المجال المغناطيسي في الملف اللولبي هو $B = \mu_0 nI$ ، ومنه ينتج أن $I = B/\mu_0 n$.

وبالتعويض بهذه القيمة في المعادلة السابقة نجد :

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 \frac{B^2}{\mu_0^2 n^2}$$

$$\text{الطاقة لوحدة الحجوم} = \frac{B^2}{2\mu_0} \qquad (20-7)$$

وهي تساوي كثافة الطاقة في مجال مغناطيسي شدته B . وعلينا مقارنة هذا المقدار بالمقدار $\frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ (المعادلة 14-17) الذي وجدناه لكثافة الطاقة في مجال كهربي موجود في الفراغ .

وإذا كان الملف اللولبي مملوءًا بمادة إنفاذيتها المغناطيسية النسبية هي K_m فإن المعادلة 7-20 ستظل قائمة إذا ضربنا μ_0 في K_m . وعلى الرغم من أننا اشتققنا المعادلة 7-20 بالنسبة لحالة ملف لولبي إلا إنها نتيجة عامة تمامًا وستتضح أهمية مفهوم الطاقة المختزنة في مجال مغناطيسي عند دراسة الطريقة التي يحمل الطاقة بها الضوء والموجات الكهرومغناطيسية الأخرى .

مثال 5-20 :

لديك ملف ما محاثته 0.500 H ومقاومته 2.0 Ω . وقد وصل هذا الملف على التوالي مع مفتاح وبطارية 12.0 V ، ومقاوم 4.0 Ω . أوجد (أ) الثابت الزمني للدائرة ، (ب) القيمة النهائية للتيار ، (جـ) قيمة التيار في اللحظة $t = 0.050$ s بعد غلق المفتاح ، (د) الطاقة النهائية المختزنة في ملف المحاثة .

أ

استدلال منطقي :

سؤال : ما هي معادلة الثابت الزمني ؟

الإجابة : $\tau_L = L/R$ ، حيث R هى **المقاومة الكلية** فى الدائرة .

سؤال : ما الذى يحدد القيمة النهائية للتيار ؟

الإجابة : إنه قانون أوم : $I_f = \mathscr{E}/R$.

سؤال : كيف يتزايد التيار مع الزمن ؟

الإجابة : تبين المعادلة 6–20 أن $I(t) = I_f(1 - e^{-t/\tau_L})$.

سؤال : كيف استخدم هذه العلاقة لحساب التيار عند لحظة معينة ؟

الإجابة : لإيجاد التيار عند أية لحظة من الزمن ، عليك بوضع قيمة t فى المعادلة 6–20 واحسب قيمة المقدار بالاستعانة بأزرار الآلة الحاسبة e^x أو (inv ln) .

سؤال : على أى شىء تعتمد الطاقة المختزنة فى ملف محاثة ؟

الإجابة : $\text{الطاقة} = \frac{1}{2}LI^2$

الحل والمناقشة : سنحصل من البيانات المعطاة أعلاه على :

$$\tau_L = \frac{L}{R} = \frac{0.50\ \text{H}}{2.0\ \Omega + 4.0\ \Omega} = 0.083\ \text{s}$$

وكما اعتدنا دائمًا فإن عليك إقناع نفسك بـأن الوحـدات المشتقة صحيحـة ، وفـى هـذه الحالة بالذات بأن وحدات هنرى لكل أوم تكافئ الثوانى . والتيار النهائى هو

$$I_f = \frac{12.0\ \text{V}}{6.0\ \Omega} = 2.0\ \text{A}$$

أما التيار عندما يكون الزمن هو $t = 0.050\ \text{s}$ فهو

$$I(t = 0.05\ \text{s}) = (2\ \text{A})\,[1 - e^{-(0.050\ \text{s})/(0.083\ \text{s})}]$$

$$= (2\ \text{A})\,[1 - e^{-(0.60)}] = (2\ \text{A})\,(1 - 0.55)$$

$$= (2\ \text{A})\,(0.45) = 0.91\ \text{A}$$

والطاقة النهائية المختزنة هى

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}(0.50\ \text{H})(2.0)^2 = 1.0\ \text{J}$$

ومرة أخرى عليك إثبات صحة الوحدات .

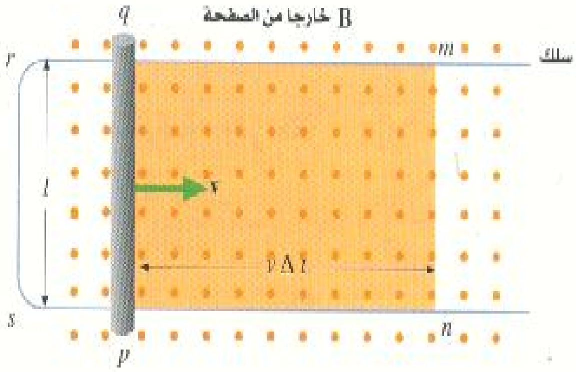
20-8 ق.د.ك الحركية

هناك طرق عديدة للحصول على ق.د.ك مستحثة . ولقد تناولنا حتى الآن تغيرات الفيض خلال ملفات ساكنة بالدرجة الأولى ، وما ينشأ من ق.د.ك المستحثة . على أنه فى بعض الأحيان تكون ق.د.ك المستحثة ناتجة عن حركة سلك خلال مجال مغناطيسى . وفى مثل هذه الحالات ، يكون من المناسب أكثر أن نشتق نتيجة لا تعتمد مباشرة على مفهوم تغير الفيض خلال عروة .

وسنبدأ تناولنا بالرجوع إلى التجربة البسيطة المبينة فى الشكل 15-20 ، حيث ينزلق قضيب طوله التقريبى l بسرعة V على طول سلكين متوازيين على شكل الحرف U يبدأ من m مرورًا بكل من r و s ثم يصل إلى n ويلاحظ أن القضيب والأسلاك تكون عروة هى $(pqrsp)$ إلى اليسار من القضيب . وكلما تحرك القضيب إلى اليمين ازدادت مساحة هذه العروة .

سنفترض الآن أن هناك مجالاً مغناطيسيًا B يتجه خارجًا من الصفحة فى هذه المنطقة . ومع حركة القضيب يزداد الفيض الذى يخترق المساحة لأن المساحة نفسها تزداد ، ولهذا تستحث ق.د.ك فى العروة . ولكى نحسب هذه القوة الدافعة الكهربية فإننا نلاحظ أن القضيب يتحرك مسافة مقدارها $v\Delta t$ فى زمن قدره Δt ، أى أن مساحة العروة تزداد بما قيمته $\Delta A = l(v\Delta t)$ ، وهى عبارة عن الجزء المظلل فى الشكل . ومقدار التغير فى الفيض هو

$$\Delta \Phi = B_{\perp}\Delta A = B_{\perp} l v \,\Delta t$$



شكل 15-20:
عندما يتحرك القضيب نحو اليمين فإن المساحة المحددة بالدائرة $pqrsp$ تزداد مما يؤدى إلى زيادة الفيض المغناطيسى خلال هذه الدائرة . وطبقًا لقانون لنز ، يؤدى هذا إلى ق.د.ك مستحثة فى الدائرة .

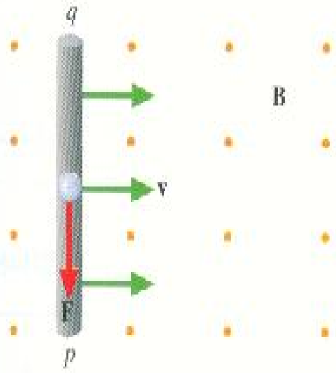
ومن ثم يكون مقدار ق.د.ك المستحثة فى العروة طبقًا لقانون فاراداى هو

$$\text{ق.د.ك المستحثة} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = B_{\perp} l v$$

وعليك التأكد من أن هذه القوة الدافعة الكهربية المستحثة سوف تنشئ تيارًا يمر فى الدائرة فى اتجاه حركة عقارب الساعة .

وهناك وسيلة أخرى لتحليل هذا الموقف . اعتبر شحنة موجبة q بداخل القضيب المتحرك كما فى الشكل 16-20 . وتتعرض هذه الشحنة بفضل حركتها بسرعة v خلال B لقوة مقدارها $qvB_{\perp}$. والمجال الكلى فى هذه الحالة متعامد مع سرعة الشحنة ولذا يكون $B = B_{\perp}$ ومنها نستنتج أن :

$$F = \text{القوة المؤثرة على } q = qvB_{\perp}$$



شكل 16-20:
القوة المؤثرة على شحنة موجبة داخل قضيب موصل وتتحرك عمودية على مجال مغناطيسى .

إذا استعملت قاعدة اليد اليمنى الواردة فى الشكل 10-19 فإنك تدرك أن القوة المؤثرة على q تتجه من النقطة q إلى النقطة p على طول القضيب . ولهذا*

$$E = \frac{F}{q} = vB$$

* وإذا شئنا التحديد فإن قيمة E هذه لا تنطبق إلا فى مناط إسناد يتحرك مع الشحنة .

وإذا تذكرنا أن فرق الجهد الكهربى بين النقطتين مساوٍ للشغل المبذول فى نقل شحنة اختبار قيمتها الوحدة من نقطة إلى أخرى (المعادلة 2-17) ، فسنصل إلى أن فرق الجهد من p إلى q بفضل المجال الكهربى E هو

$$V = El = B_{\perp}vl$$

يلاحظ هنا أن هذا المقدار مساوٍ تمامًا للقوة الدافعة الكهربية المستحثة فى العروة والتى أوجدناها باستخدام قانون فاراداى . ثم إن المجال الكهربى المستحث بحركة الشحنة يسبب مرور تيار فى اتجاه حركة عقارب الساعة فى العروة ، وهو أيضًا نفس الاتجاه الذى وجدناه من قانون فاراداى . وفيما يلى تلخيص للنتائج التى حصلنا عليها :

عندما يتحرك سلك (أو قضيب) طوله l بسرعة **v** عموديًا على كل من المجال المغناطيس **B** وطوله نفسه فإن ق.د.ك تستحث عبر طول هذا السلك :

$$\text{ق.د.ك المستحثة} = B_{\perp}vl \qquad (20\text{-}8)$$

وهى ما يطلق عليها **ق.د.ك الحركية** . ويلاحظ أنه من غير الضرورى وجود عروة أو دائرة كاملة لظهور ق.د.ك مستحثة بين طرفى القضيب . وفى الحالة الأكثر عمومية عندما لا تكون **B** ، **v** والسلك متبادلة التعامد فإن مركبتى **B** و **v** المتعامدتين مع بعضهما ومع السلك هما اللتان تستعملان .

وكثيرًا ما تعاد صياغة الجملة التى سبقت المعادلة 8-20 ليعبر عنها بقطع خطوط المجال المغناطيسى . فعندما يتحرك القضيب المبين فى الشكل 10-20 بحيث يغير الفيض المار خلال العروة بمقدار $\Delta\Phi$ ، فإن القضيب يقطع خطوط المجال المغناطيسى . ولكن ق.د.ك المستحثة فى القضيب هى ببساطة $\Delta\Phi/\Delta t$ ، أى تتناسب مع المعدل الذى يقطع به القضيب خطوط المجال ومن ثم يمكننا النص على :

لقد استحث السلك المتحرك داخل نفسه ق.د.ك تتناسب مع معدل قطع السلك لخطوط المجال المغاطيسى .

ومفهوم ق.د.ك الحركية مناسب فى كثير من المواقف كما سنرى لاحقًا .

وقبل أن نغادر هذا القسم لابد من بضع كلمات حول بقاء الطاقة عندما يتولد تيار بواسطة ق.د.ك حركية . ففى الرسم الموضح بالشكل 15-20 يتحدد مقدار التيار فى الدائرة $(pqrsp)$ بقيمة مقاومة الدائرة . وتتولد طاقة حرارية فى المقاومة R بمعدل I^2R أو $\frac{(\text{ق.د.ك})^2}{R} = \frac{(\text{emf})^2}{R}$ ، فمن أين أتت هذه الطاقة ؟ وتكمن الإجابة فى حقيقة أنه بمجرد تولد التيار فى القضيب المتحرك ، فإن قوة مغناطيسية ستؤثر على القضيب ، ويمكنك إثبات أنه إذا كان التيار يتجه من q إلى p فى الشكل 15-20 ، فإن القوة ستتجه إلى اليسار ، أى فى عكس اتجاه سرعة القضيب . **ويعنى هذا ضرورة تطبيق قوة مساوية فى المقدار واتجاهها هو اتجاه الحركة حتى تضمن سرعة ثابتة للقضيب .** وسنعبر عن هذا بصيغة رياضية :

القوة المغناطيسية المؤثرة على القضيب : إلى اليسار $F = BIl$

والقدرة التي تنشأ عن تطبيق قوة مساوية إلى اليمين هي :

$$F_{app}v = BIlv = Blv\frac{\text{emf}}{R} = Blv\frac{(Blv)}{R} = \frac{(Blv)^2}{R}$$

والقدرة الحرارية المبددة في R هي : $P = \frac{(\text{emf})^2}{R} = \frac{(Blv)^2}{R}$

من الواضح أن القدرة التي تسببها القوة المطبقة مساوية للقدرة المبددة على هيئة حرارة في المقاومة . أي أن الطاقة ـ كما هي دائمًا ـ محفوظة .

مثال 6-20 :

ثبت قضيب طوله 5.0 m أفقيًا بحيث كان محوره في الاتجاه شرق ـ غرب ثم سمح له ليسقط مباشرة إلى أسفل . ما مقدار ق.د.ك المستحثة بداخله عندما تكون سرعته 3.0 m/s إذا كان المجال المغناطيسي لأرض 0.60 G ويميل بزاوية مقدارها °53 تحت الخط الأفقي ؟

استدلال منطقي :

سؤال : على أي شيء تعتمد ق.د.ك المستحثة ؟

الإجابة : على سرعة القضيب المتعامدة مع طوله ، وطوله وشدة المجال المغناطيسي المتعامد مع السرعة . والمعادلة 8–20 تعطي :

$$\text{emf} = B_\perp vl$$

سؤال : كيف يمكن حساب $B_\perp$ ؟

الإجابة : بما أن السرعة رأسية ، تكون $B_\perp$ هي المركبة الأفقية للمجال **B** والرسم المتجهي البياني للمجال سيشير إلى أن $B_\perp = B\cos 53°$.

سؤال : قيمة المجال المعطاة هي 0.60 G . فما هي وحدات SI المقابلة ؟

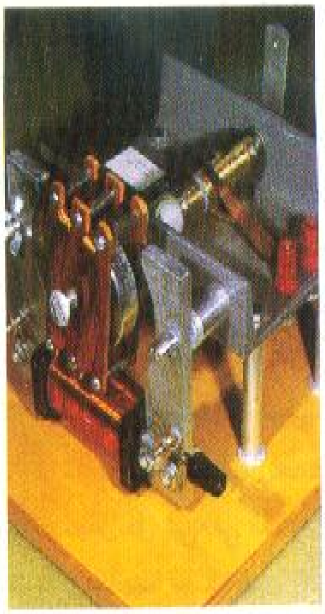
الإجابة : العلاقة بين الوحدتين هي $1\ \text{T} = 10^4\ \text{G}$.

الحل والمناقشة :

$$\text{emf} = (0.60 \times 10^{-4}\ \text{T})(\cos 53°)(3.0\ \text{m/s})(5.0\ \text{m}) = 5.4 \times 10^{-4}\ \text{V}$$

20-9 مولدات التيار المتردد

المولد هو جهاز يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية . وهو يؤدي هذا عن طريق تغيير الفيض المغناطيسي خلال ملف ، مستحثًا بذلك ق.د.ك بين طرفي الملف ومن الناحية النظرية فإن الفيض يمكن تغييره إما بتحريك مغناطيس بالنسبة للملف أو تحريك الملف بالنسبة للمغناطيس . وتحقيق العملية الثانية أسهل من الناحية التطبيقية وهي عادة ما تستعمل .

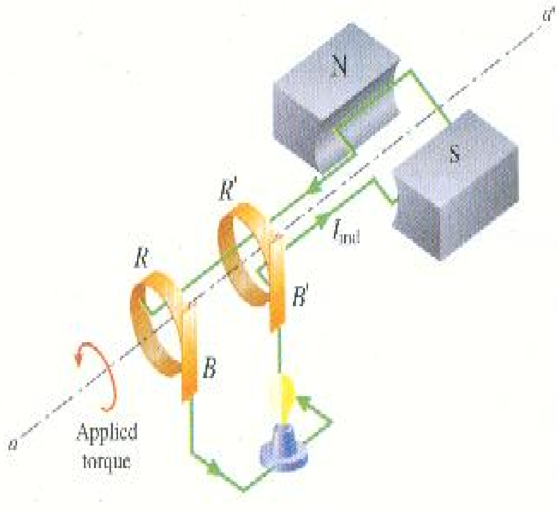


نموذج لإستعراض عمل المولد وهو يـدار باليـد . وهـو مكـون مـن ملف دوار ومغناطيس يحيط به (يغذى هذا المغناطيس الكهربى بواسطة الملف المستطيل السفلى) ، وفرشاتان حلقتى الإنزلاق على محور الملف (اللتان تتصلان بالطرفين الأحمرين) .

ويوضح الشكل 17–20 رسمًا تخطيطيًا لمولد بسيط ، حيث تدار عروة من السلك بواسطة مصدر خارجي للطاقة ، في وجود المجال المغناطيسي للمغناطيس . (وتستبدل العروة عمليًا بملف ملفوف حول قلب حديدى لكى يقوى التأثيرات التى ذكرناها) وبدوران العروة فإن الفيض الذى يتخللها يتغير بشكل مستمر . ويستحث هذا الفيض المتغير ق.د.ك في العروة ، وتؤدى هذه إلى تيار يمر في العروة في الاتجاه المشار إليه في الشكل . ويمكن استخدام هذا التيار في شغل مفيد مثل إضاءة بصيلة مصباح كما بالشكل .

ولابد أن يبذل مصدر الطاقة الخارجي الذي يدير الملف الحد الأدنى من الشغل ضد قوى الاحتكاك وذلك في مولد جيد التصميم . على أنه لابد أن يبذل شغلاً ما لأن المولد ينتج تيارًا يمكنه بذل شغل . ونستطيع إدراك كيفية حدوث التبادل بين الشغل عند المدخل والشغل عند المخرج ، إذا تذكرنا ما يحدث لسلك يحمل تيارًا في ملف . وحيث أن السلك يمر خلال مجال مغناطيسي ، فإن التيار يتعرض لقوة بفضل المجال المغناطيسي . وكما رأينا في المثال الوارد في القسم السابق فإن هذه القوة تكون في اتجاه يعاكس دوران الملف ؛ وكلما زاد التيار زادت القوة المعاكسة . وهكذا نرى أن المصدر الخارجي للطاقة عليه أن يبذل شغلاً لإدارة الملف ، وأنه كلما زاد التيار المسحوب من المولد للاستفادة منه في شغل مفيد ، كلما زاد الشغل الذى يبذله مصدر الطاقة الخارجي لإدارة الملف . وبهذا فإن مصدر الطاقة الذى يدير المولد هو الذى يوفر الطاقة التى يستخدمها تيار المولد ليبذل شغلاً مفيداً . وقد يكون أحد مساقط المياه أو محركات الديزل مثالاً على المصدر الخارجي للطاقة . ولنفحص الآن عمل المولد بشيء من التفصيل حتى نتمكن من معرفة شكل ق.د.ك التى ينتجها .

سنبدأ بتخيل ملف يحتوى على N عروة بدلاً من العروة البسيطة في الشكل 17–20 . يدور الملف حول المحور $a\,a'$ في مجال مغناطيسي منتظم . ويلاحظ أن أحد طرفي الملف متصل بحلقة R بينما يتصل الطرف الثاني بالحلقة R' . وتثبت هاتان الحلقتان – **حلقتا الانزلاق** – جيدًا بالملف وتدوران معه كوحدة واحدة . ويتم الاتصال بين الحلقتين الدائرتين والطرفين الخارجين الثابتين بواسطة فرشاتين B و B' تنزلقان على الحلقتين . وقد تكون الفرشاتان عبارة عن شريطين قصيرين من الصلب الزنبركي في المحركات البسيطة للغاية .

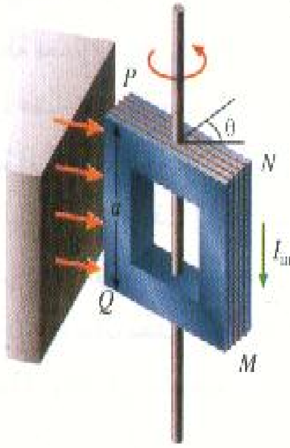


شكل 17–20:
عندما تدور العروة في مجال مغناطيسي فإن ق.د.ك مترددة تتولد بين الطرفين B و B' .

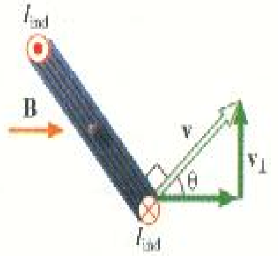
وسنحاول التعرف على كيفية تولد ق.د.ك المستحثة بين طرفى الملف ، ولـهذا سنرجع إلى الشكل 18–20 (أ) حيث يفترض أن الملف يدور فى الاتجاه المبين . وكما ترى فإنه يتحرك من وضع تكون خطوط المجال فيه متعامدة مع مستواه إلى وضع تمر الخطوط وكأنها تنزلق عليه . وبعبارة أخرى فإن الفيض الناتج عن خطوط المجال المتجهة إلى اليمين خلال الملف يتناقص ، وبسبب هذا التغير فإن ق.د.ك تستحث فى الملف .

وسندرك عند استعمال قانون لنز أن ق.د.ك المستحثة فى الملف بسبب الفيض المتغير ، تستحث هى الأخرى تيارًا فى الاتجاه المبين ، لكى تحاول المحافظة على الفيض خلال الملف ، أى تحاول معاكسة التغير .

على أنه تجب ملاحظة ما يحدث عندما يدور الملف بزاوية مقدارها $180°$ من الوضع المبين . سيظل كل شيء فى الشكل 18–20 (أ) كما هو فيما عدا أن النقطتين M و N سيتبادلان مكانيهما مع النقطتين Q و P . ونتيجة لـهذا فإن التيار المستحث سيتجه الآن فى اتجاه يعاكس ما كان عليه من قبل . ومن الواضح أن التيار المستحث فى الملف سيظل يعكس اتجاهه كلما استمر الملف فى الدوران .



(أ) منظور



(ب) منظر علوى

شكل 18–20:
تتواجد ق.د.ك مستحثة فى الملف الدوار ، مما ينشأ عنه تيار مستحث فى الملف .

وسنقوم الآن بتحليل الموقف بطريقة كمية حيث نحسب $\Delta\Phi / \Delta t$ بالنسبة للملف ثم نستخدم قانون فاراداى لحساب ق.د.ك المستحثة . وتكون هذه الطريقة مناسبة جدًا إذا لجأنا إلى حساب التفاضل والتكامل . على أن بإمكاننا اختيار تحليل الموقف بدلالة ق.د.ك الحركية .

سنحسب ق.د.ك المستحثة فى الضلع MN الذى يتحرك بسرعة $\mathbf{v}$ خلال المجال وذلك بحساب $v_\perp$ أولاً ، وهى مركبة السرعة $\mathbf{v}$ ، المتعامدة مع $\mathbf{B}$ بالرجوع إلى الشكل 18–20 (ب) نجد أن $v_\perp = v \sin\theta$. وبما أن الضلع MN والمجال $\mathbf{B}$ ، والسرعة $\mathbf{v}_\perp$ تتعامد فيما بينها فإن ق.د.ك المستحثة فى MN ستكون :

$$(\text{emf})_{MN} = B(v \sin\theta)(a)$$

وسندرك عند استعمال قاعدة اليد اليمنى بالنسبة لانحراف الشحنات الموجبة المتحركة أن اتجاه التيار المستحث يكون من N إلى M فى الضلع MN ومن Q إلى P فى الضلع PQ . ومن ثم فإن ق.د.ك مستحثة مماثلة فى PQ سوف تتراكم مع ق.د.ك المستحثة فى MN . يلاحظ أن الضلعين PN و MQ لا يقطعان خطوط المجال عند دوران الملف ، ولـهذا لن تستحث ق.د.ك فى هذين الضلعين .

$$\text{ق.د.ك المستحثة فى العروة} = 2\,Bva \sin\theta$$

ويمكن وضع هذه المعادلة فى صورة أكثر ملاءمة ، إذا لاحظنا أن v هى السرعة المماسية للنقطة M وهى ترسم دائرة حول محور الدوران ، فإذا كان نصف قطر هذه الدائرة هو r $\left(r = \frac{1}{2}\overline{MQ}\right)$ فإن :

$$v = \omega r = 2\pi f r$$

حيث ω هى السرعة الزاوية الثابتة للملف و f هو تردد الدوران للملف ولا شك أنك

تتذكر من الفصلين السابع والثالث عشر أن ω تقاس بوحدات الزوايا النصف قطريـة فـى الثانية ويقاس f بوحدات هيرتز . وبالإضافـة إلى هـذا ، فالزاويـة θ هـى ببسـاطة زاويـة دوران العروة وتتزايد باستمرار حسب العلاقة :

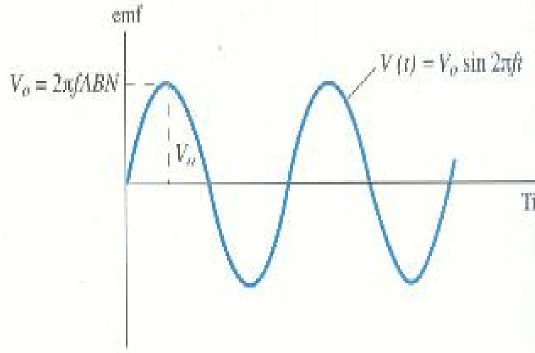
$$\theta = \omega t = 2\pi ft$$

وعند إجراء التعويض المناسب ، فإن ق.د.ك المستحثة تصبح :

$$\text{emf} = 2\pi fB(2ra)\sin 2\pi ft$$

ولكن $2ra$ ليست سوى مساحة العروة ولذا تكون النتيجة النهائية هى

$$\text{emf} = 2\pi fAB\sin 2\pi ft \qquad (20\text{-}9)$$



شكل 19-20:
تستحث قوة دافعة كهربية متـرددة فـى ملف يدور فى مجال مغناطيسى منتظـم وتتغير ق.د.ك كدالة جيبية مع الزمن .

وعندما نتعامل مع ملف به N لفة بدلاً من عروة منفردة فإن ق.د.ك ستكون أكبر N مرة .

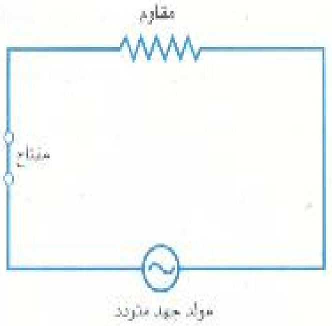
وكما هو واضح ، فإن **ق.د.ك المستحثة فى ملف دوار تتغير كدالة جيبية مع الزمـن** كما يبين ذلك الشكل 19-20 ، حيث تصل ق.د.ك المستحثة (أو الفولطية) إلى قيمتها القصوى عندما يكون $\sin 2\pi ft = 1$ ، وعندئذ تصبح قيمتها العظمى هى $2\pi fABN$. من المنطقى إذن أن الفولطية القصوى تكون كبيرة عند قيم f الكبـيرة (أى أن الفيض يتغير بسرعة) ، وعند قيم A و B الكبيرة (أى عندما يكون الفيض نفسه كبيرًا) ، وعندما يكون عدد اللفات بالملف كبيرًا .

وكثيرًا ما تكتب المعادلة 9-20 على الصورة البديلة التالية :

$$V = V_0 \sin 2\pi ft$$

حيث تعبر V عن قيمة الفولطية عند أية لحظة t ، و V_0 عن القيمة القصوى لـها . ومن الواضح أن الفولطية فى الملف الدوار تتغير كدالة جيبية وتعكس اتجاهها مرتين فـى كـل دورة .

وهكذا يصير واضحًا مما تقدم أن ملف السـلك الـذى يـدور بسرعة زاويـة ثابتـة فـى مجال مغناطيسى ، ستتولد عنـد طرفيـه ق.د.ك مـترددة . ولـو أن مثـل هـذا المولد هـو المستخدم كمصدر للقدرة فى الدائرة البسيطة المبينة فى الشكل 20-20 ، فإن التيار المـار فى المقاوم سيعكس اتجاه $2f$ مرة كل ثانيـة . (يلاحـظ أن الرمـز المستخدم لمولد جـهد متردد هو (~)) .

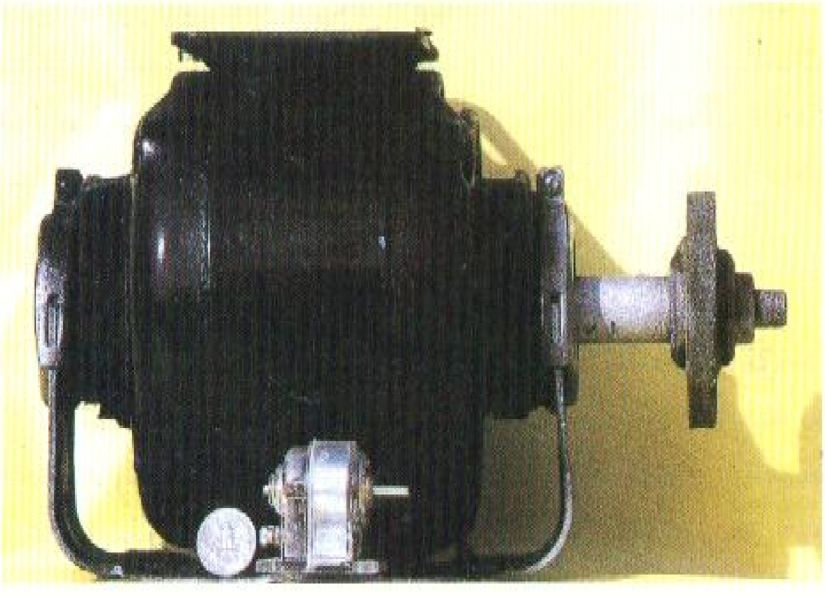


شكل 20–20:
دائرة تيار متردد بسيطة .

وعادة ما تكون مولِّدات التيار المتردد التى تستخدمها شركات توزيع القوى الكهربائية ، أكثر تعقيدًا من التى ناقشناها هنا ، إلا أن نظرية عملها الأساسية هى نفسها . والطاقة الميكانيكية اللازمة لإدارة الملف يتم توفيرها عادة باستخدام توربينات بخارية أو بقوى اندفاع الماء . وسنتناول بإيجاز عملية تحويل الطاقة فى نظام كالموضح فى الشكل 20–20 .

عندما تكون الدائرة مفتوحة بحيث لا يمر بها تيار خلال ملف المولد ، فإن القدر اليسير من القوة سيكون كافيًا لإدارة الملف . ولكن بمجرد أن يسحب تيار من المولد (الملف) ، فإن المجال المغناطيسى يؤثر بقوة على أسلاك المولد الحاملة للتيار ، وتكون هذه القوة بحيث تحاول إيقاف الملف عن الدوران . ومن ثم فالطاقة الميكانيكية التى يغذى بها المولد تعتمد على مقدار التيار المسحوب من نفس المولد . أى أن المزيد من التيار يتطلب المزيد من الطاقة الميكانيكية .

وفى اللحظة التى يكون فيها جهد المولد V فإن القدرة التى تصل إلى المقاوم فى الشكل 20–20 ستكون VI (المعادلة 7–18) . ومن الواضح أنه عند قيم صغيرة جدًا للتيار ، فإن القدرة التى يستهلكها المقاوم تكون صغيرة والطاقة الميكانيكية اللازمة لتشغيل المولد ستكون هى الأخرى صغيرة . ومن ثم نرى أن **الطاقة اللازمة لتشغيل المولد تعتمد على مقدار الطاقة المسحوب منه إذ تتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية بواسطة التفاعل بين المجال المغناطيسى وحركة الشحنة داخل ملف المولد .**

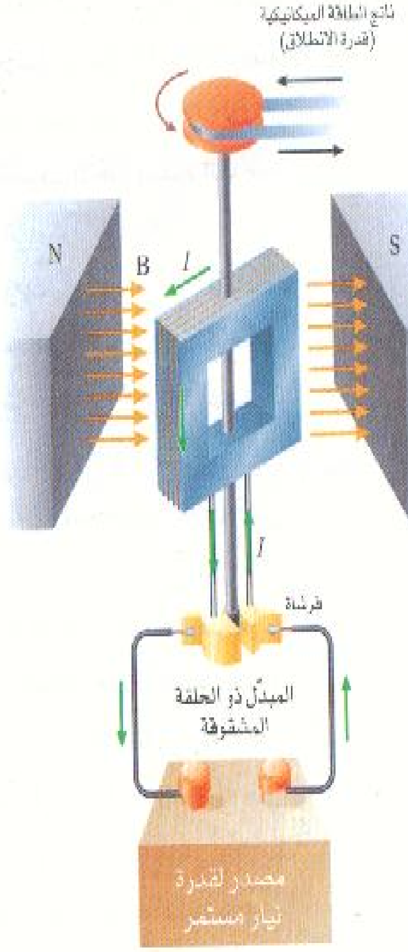


تستخدم المحركات الكهربائية فى العديد من التطبيقات ويظهر هذا من التنوع الكبير فى أحجامهما .

10–20 المحركات الكهربائية

المحرك الكهربائى هو جهاز يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية . ويوضح الشكل 21–20 رسمًا تخطيطيًا لمحرك بسيط ، حيث يبعث مصدر للقوة الدافعة الكهربية (فى هذه الحالة بطارية) التيار خلال عروة من السلك الذى يقع جزء منه فى

المجال المغناطيسى الذى يوفره مغناطيس دائم . وهذا المجال المغناطيسى الخارجى هو الذى يجعل العروة تتعرض لعزم دورانى بإدارة العروة حول محورها . (ويمكنك الاقتناع



شكل 21–20:
محرك بسيط يعمل بالتيار المستمر وعندما تكون حلقتا الانزلاق فى الوضع المبين بالشكل ، فإلى أى جهة يدور المحرك ؟

بأن العروة تدور فى الاتجاه المبين إذا طبقت قاعدة اليد اليمنى بالشكل 10–19) وهكذا فالطاقة التى تقدمها البطارية للعروة تجعل العروة تدور ، أى تجعلها تبذل شغلاً خارجيًا بالاستعانة ببكرة متصلة بمحورها . وكلما زاد الشغل الذى يبذله المحرك ، كلما كان من الصعب عليه الدوران وكلما زاد بالتالى مقدار الطاقة الواجب على البطارية أن تقدمه .

ولنتخيل أننا استعملنا ملفًا ملفوفًا حول قلب حديدى بدلاً من العروة المنفردة التى تظهر فى الشكل 21–20 ، وذلك حتى يبدو المحرك أقرب إلى الواقع . ولقد درسنا من قبل أن الملف ذا القلب الحديدى يعمل كمغناطيس كهربائى إذا مر به تيار . وبالرجوع إلى القسم 19–11 والشكل 23–19 فسنقتنع أن الجانب الأمامى للملف (كما هو مبين بالشكل) هو قطبه الشمالى وأن الجانب الخلفى هو القطب الجنوبى . ونظرًا لوجود قطبى المغناطيس الدائم بجوار الملف ، فإن القوتين المؤثرتين على قطبى الملف ستجعلانه يدور فى الاتجاه المبين . إلا أنه عندما يصبح مستوى الملف متعامدًا مع الصفحة فإن قطبه الجنوبى سيكون أقرب ما يكون من القطب الشمالى للمغناطيسى الدائم ؛ حيث يتوقف عندئذ الملف عن الدوران إذا لم يحدث شىء آخر .

والواقع أنه لكى يظل الملف دائرًا ، فلابد لنا من عكس اتجاه التيار المار بداخله

بحيث ينعكس قطباه الشمالى والجنوبى . وتتم عملية العكس هذه بواسطة ما يسمى **المبدّل ذو الحلقة المشقوقة** . ويتم إجراء الاتصال الكهربى باستعمال نصفى الحلقة المنفصلين وخلال الفرشاتين الثابتتين اللتين تنزلقان على الحلقة عندما تدور هى والملف معًا . (وتصنع الفرشاتان عادة من كتلتين من الجرافيت الموصل سهل الانزلاق ، وهما تنضغطان على نصفى الحلقة بواسطة زنبركين) . ويلاحظ أنه عندما يدور الملف فإن التيار يدخل إليه أولاً من خلال أحد نصفى الحلقة ثم من خلال النصف الآخر وبهذه الطريقة ينعكس التيار المار خلال الملف فى اللحظة المناسبة تمامًا لكى يظل الملف دائرًا .

وهناك العديد من أنواع المحركات الكهربائية ، وكثير منها يستخدم مغناطيسات كهربائية بدلاً من المغناطيسات الدائمة . بل إن معظمها يستعمل أكثر من ملف حتى ينتج عزم دوران أكثر ثباتًا . وبعض المحركات تتم تغذيته بفولطية مترددة ومستمرة بينما يتغذى البعض الآخر إما على هذه أو تلك فقط . وعلى أية حالة فإن مصدر ق.د.ك يقوم بإمداد الملف بالطاقة بواسطة التيار . وهذه الطاقة هى التى يستخدمها الملف لكى يبذل الشغل .

وقبل أن نترك موضوع المحركات ، لابد أن نشير إلى أن المحرك يشبه إلى حد بعيد مولد يدور فى عكس تسلسل العمليات . فالملف الدوار فى المحول يعمل كملف المولد وتتولد بداخله ق.د.ك ، وهذه تكون فى اتجاه بحيث تعاكس ق.د.ك التى تدير المحرك . ولهذا السبب تسمى **ق.د.ك عكسية أو مضادة** وبما أن مقاومة المحرك تكون صغيرة فى العادة ، فإن ما يحدد قيمة التيار خلاله بدرجة أساسية هو ق.د.ك العكسية . وعندما يزيد الحمل على محرك ما فإنه يبطئ من حركته ، وهذا يؤدى إلى انخفاض ق.د.ك العكسية (لماذا ؟) ويسمح بذلك للمحرك أن يسحب تيارًا أكبر ، والتيار الزائد المار فى محرك به تحميل زائد قد يؤدى أحيانًا إلى احتراق ذلك المحرك . ولكى تتم حماية المحركات من هذه العملية فإن لكثير منها مفتاح حرارى يقوم بقطع الطاقة عنها (بإطفائها) عندما ترتفع درجة حرارتها بشكل زائد .

مثال 7-20 :

تبلغ مقاومة لفات محرك يعمل بالتيار المستمر $2.0\ \Omega$ وهو مزود بمغناطيس دائم . وقد صمم هذا المحرك الخاص ليوفر قدرة ميكانيكية مقدارها $500\ W$ عندما يغذى من خط قدرة $120\ V$ يمده بتيار يصل إلى $20\ A$. (أ) ما هو التيار الذى يسحبه المحرك ؟ (ب) ما مقدار ق.د.ك العكسية التى تتولد فى المحرك ؟

استدلال منطقى :

1

سؤال : بماذا ترتبط القدرة الناتجة عن المحرك ؟

الإجابة : إن بعض القدرة التى تغذى المحرك من خط القدرة ، يتحول إلى حرارة مستهلكة فى مقاومة المحرك . ويمكن تحويل ما يتبقى إلى قدرة ميكانيكية .

سؤال : ما هى المعادلة المعبرة عن القدرة التى تمدها البطارية ؟

الإجابة : من المعادلة 7-18: $P = IV$ (المقدمة من البطارية) .

سؤال : ما هى القدرة المبددة فى المقاومة ؟

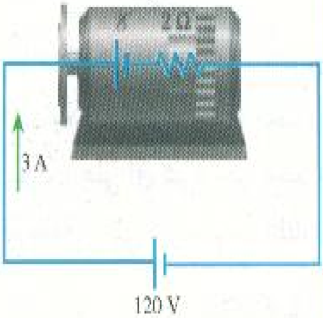
الإجابة : إنها مرة أخرى المعادلة 7-18 : $P = I^2R$ (الحرارة)

سؤال : ما هى معادلة القدرة التى يوفرها المحرك ؟

الإجابة : $500\ W = P$ (المتوفرة) $- P$ (حرارة) $P = P$

وهذه العلاقة تؤدى إلى معادلة من الدرجة الثانية ، حلها يؤدى إلى معرفة التيار :

$$IV - I^2R = 500\ W$$



شكل 20-22:
يعمل المحرك كما لو كان مقاومة متصلة على التوالى مع ق.د.ك عكسية .

سؤال : ما الذى يحدد قيمة ق.د.ك العكسية للمحرك ؟

الإجابة : إن المحرك كعنصر من عناصر الدائرة ، يمكن معاملته كمقاومة متصلة على التوالى مع ق.د.ك العكسية الخاصة به . (الشكل 20-22) . ولدينا من قاعدة العروة لكيرتشوف :

$$110\ V - \mathscr{E} - IR = 0$$

فإذا كانت قيمة I معلومة ، لأمكن إيجاد ق.د.ك العكسية .

الحل والمناقشة : أولاً ، لابد من وضع المعادلة من الدرجة الثانية فى I على الصورة القياسية : $ax^2 + bx + c = 0$

$$-RI^2 + VI - 500\ W = 0$$

ومنها نستنتج أن المعاملات هى : $a = -R$ ، $b = V$ ، $c = -500$

وحل هذه المعادلة هو :

$$I = \frac{-V \pm \sqrt{V^2 - 4(-R)(-500)}}{2(-R)}$$

والحلان الممكنان لهذه المعادلة يمكن إيجادهما عند التعويض عن قيمتى V و R

$$I = 5\ A\ ,\quad 50\ A$$

وعلينا دائمًا اختيار الحل الذى يؤدى إلى معنى **فيزيائى** . والقيمة الكبيرة 50 A للتيار أكبر من أن يوفرها خط القدرة . أما إذا أخذنا الحل الثانى وهو $I = 5\ A$ فإننا سنجد قيمة ق.د.ك العكسية .

$$\mathscr{E} = 110\ V - IR = 100\ V$$

ومنها يتضح أن ق.د.ك العكسية للمحرك يمكن أن تكون كبيرة تمامًا .

مثال 8-20 :

صمم مولد للتيار المتردد لكى يعطى جهدًا مترددًا تردده 60 Hz ؛ ويحتوى ملفه على 500 لفة ويدور فى مجال مغناطيسى شدته 0.50 T . (أ) ما هى مساحة الملف التى

تجعل القيمة القصوى للقوة الدافعة الكهربيـة V 120 ؟ (ب) وإذا كـانت ق.د.ك تتغير مع الزمن حسب العلاقة البيانية فى الشكل 19-20 ، فما هى قيمة الجهد اللحظى عند $t = 10^{-3}$ s ؟ وبعد كم من الوقت سيكون للفولطية نفس الطور ؟

1

استدلال منطقى :

سؤال : كيف تعتمد ق.د.ك القصوى على مساحة الملف ؟

الإجابة : تتناسب ق.د.ك القصوى مع A تناسبًا طرديًا .

سؤال : على أى شىء آخر تعتمد ق.د.ك القصوى ؟

الإجابة : على التردد وعدد اللفات والمجال المغناطيسى :

$$(\text{ق.د.ك})_{\text{قصوى}} = \text{emf}_{\max} = V_0 = 2\pi fNAB$$

حيث $V_0 = 120$ V

سؤال : ما هى المعادلة التى تصف السلوك الزمنى الوارد فى الشكل 19-20 ؟

الإجابة : لابد من تذكر ، أن المعادلة العامة للدالة الجيبية فى الاعتماد على الزمن هـى $\sin 2\pi ft$ ، وذلك من الفصل الرابع عشر . ولـهذا فإن $V(t) = V_0 \sin(2\pi ft)$.

سؤال : ما هى قيمة V عند زمن 10^{-3} s ؟

الإجابة : لابد من إيجاد قيمة الجيب (sin) مع تذكر أن ($2\pi ft$) مقاس بالتقدير الدائرى . وبما أن $f = 60$ Hz ، فإن :

$$2\pi ft = 2\pi(60/\text{s})(10^{-3}\ \text{s}) = 0.377\ \text{rad}$$

سؤال : ما هى تكرارية اتخاذ الجهد لنفس القيمة فى طوره ؟

الإجابة : إنه يتخذ نفس القيمـة مـرة واحـدة ، كـل دورة ، أو خـلال **الزمـن الـدورى** للذبذبة والزمن الدورى يساوى $1/f$.

الحل والمناقشة :

$$A = \frac{V_0}{2\pi fNB} = \frac{120\ V}{2\pi(60/\text{s})(500)(0.50\ \text{T})}$$

$$= 6.4 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$$

وتناظر هذه الكمية مساحة مربع طول ضلعه نحو 2.5 cm (أو بوصة واحدة) .

وعند اللحظة $t = 10^{-3}$ s فإن $\sin(0.377\ \text{rad}) = 0.368$. أى أن قيمة الجهد فى هـذه اللحظة :

$$V = (120\ \text{V})(0.368) = 44.2\ \text{V}$$

والزمن الدورى للجهد المتذبذب هو

$$T = \frac{1}{f} = 0.0167\ \text{s}$$

20-11 المحولات

يتم أحد أهم تطبيقات الحث الكهرومغناطيسي في المحول ، وهو أداة تقوم بتغيير (أو تحويل) جهد متردد إلى جهد متردد آخر . ففي جهاز تليفزيون عادى - مثلاً - يغير المحول الجهد المتردد الداخل للجهاز ومقداره 120 V إلى جهد أعلى مقداره 15,000 V يلزم لتشغيل أنبوبة الصور بالجهاز . وكمثال آخر على استخدام المحول ، فإن جرس الباب العادى يحتاج إلى جهد يبلغ نحو 9 V ولذا لابد من محول للحصول على هذا الجهد المنخفض من جهد خط القدرة بالمنزل وهو 120 V . ولا يمكن استعمال المحولات لتحويل الجهود الخاصة بالتيار المستمر ، نظرًا لأهمية حدوث فيض دائم التغير حتى تعمل .



تستخدم المحولات (التى تظهر فى مقدمة الصورة) فى محطة القوى الكهربية الفرعية لتحويل الجهد المتردد العالى الذى تنقله عبر البلاد خطوط نقل القدرة الكهربية إلى جهود منخفضة تستخدم خطوط التوزيع المحلية .

ويوضح الشكل 23-20 محولاً نموذجيًا . ويتكون المحول من قلب حديدى يلتف حوله ملفان ، أولهما هو الابتدائى (ويحتوى على N_p لفة) وثانيهما الثانوى (وبه N_s لفة) . يتصل الملف الابتدائى عادة بمصدر التيار المتردد . فيتكون بهذا فيض مغناطيسى متغير فى القلب الحديدى . وبما أن خطوط الفيض تميل إلى اتباع الحديد فإن الخطوط تأخذ فى الدوران مخترقة الملف الثانوى كما فى الشكل . ولهذا يكون الفيض Φ خلال كل من الملفين الابتدائى والثانوى هو نفسه .

يؤدى الفيض المتغير خلال الملف الثانوى إلى ظهور ق.د.ك مستحثة فيه :

$$\text{ق.د.ك الثانوية} = -N_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

ومقاومة اللفات فى معظم المحولات مهملة ولهذا فإن ما يحدد قيمة التيار فى الملف الابتدائى هو ق.د.ك العكسية فى الملف الابتدائى والتى استحثها بنفسه . وبعبارة أخرى فإن ق.د.ك المستحثة فى الابتدائى ستكون مساوية لفولطية مصدر القدرة ونستطيع

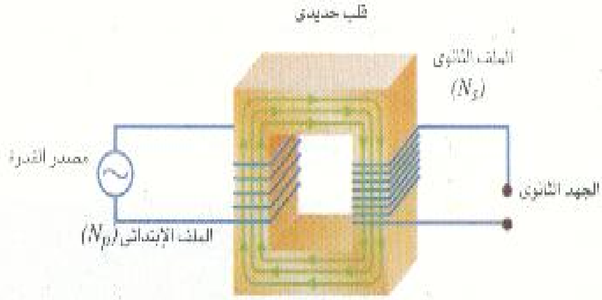
من ثم أن نكتب .

$$\text{ق.د.ك الابتدائية} = -N_p \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

حيث Φ هو نفس الفيض الذى يتخلل الملف الثانوى .

والنسبة بين هاتين القوتين الدافعتين هى

$$\frac{\text{ق.د.ك الثانوية}}{\text{ق.د.ك الابتدائية}} = \frac{N_s}{N_p} \qquad (20\text{–}10)$$



شكل 23–20:
محول رافع ذو قلب حديدى

وهذه هى **معادلة المحول** ، وهى تعبر عن العلاقة بين ق.د.ك الثانوية و ق.د.ك الابتدائية . والنسبة بين الاثنتين كالنسبة بين عدد لفات الملفين . ويطلق على المحول الذى يرفع ق.د.ك الداخلة ($N_s > N_p$) اسم **المحول الرافع** ، وعلى المحول الذى يخفضها ($N_s > N_p$) اسم **المحول الخافض** . لاحظ أنه يجب أن تتذكر بعناية أن المحولات تعمل بجهود التيار المتردد وليس التيار المستمر .

عندما لا تكون الدائرة الثانوية مقفلة فإن التيار المار بها يكون صفرًا أى أنه لا يحدث فقد فى القدرة فى الملف الثانوى عندما لا يستخدم . وبالإضافة إلى ذلك فسنثبت فى الفصل التالى أنه لا يوجد فقد أيضًا فى ملف محاثة إذا كانت مقاومته صفرًا . وتتيح هذه الحقيقة لشركات توزيع القوى الكهربائية أن تحتفظ بالمحولات موصلة خلال المدينة كلها حتى ولو لم يكن هناك من يستخدم الكهرباء التى توفرها تلك الشركات . والمحولات أنفسها تستهلك النذر اليسير من الطاقة .

إلا إنه إذا سحب تيار من الملف الثانوى لتشغيل مدفأة كهربائية مثلا فإن قدرًا من الطاقة سوف يستهلك بالمدفأة . وهذه الطاقة لابد من تعويضها وتغذية الملف الابتدائى للمحول بها حتى يتمكن من توصيلها إلى الثانوى . وتحت هذه الظروف فإن فقد القدرة فى الثانوى يجعل الابتدائى يعمل كما لو كانت لديه مقاومة .

ويتعلق أحد أهم استخدامات المحولات بنقل القدرة ، فكثير من شركات الكهرباء تقوم بتوصيل الكهرباء إلى مدن قد تقع على بعد 100 km من المولدات وهذا يمثل مشكلة حقيقية . افترض أن كل شخص فى المدينة التى قوامها 100,000 نسمة يستهلك 150 W من القدرة الكهربائية وهو ما يمثل بصيلة إضاءة أو اثنتين مشتعلتين لكل شخص . وتكون القدر المستهلكة هى W (100,000)(150) وحين يكون الجهد هو 120 V (وهو الجهد المعتاد فى المنازل فى الولايات المتحدة) فإن القدرة الكلية تصبح :

$$P_{tot} = VI$$

$$(150 \text{ W})(100{,}000) = (120 \text{ V})(I)$$

$$I = 125{,}000 \text{ A}$$

وحيث أن الأسلاك الكهربائية العادية فى المنازل تستطيع أن تتحمل تيارًا يبلغ نحو 20 A بشكل آمن ودون حدوث تسخين زائد ، فإن شركة الكهرباء ستحتاج إلى ما يكافئ نحو 6500 من تلك الأسلاك لكى تحمل قدرة بهذا المستوى إلى المدينة . وعلى الرغم من إن هذا ليس مستحيلاً ، إلا أن تكلفة النحاس بمفرده ستكون باهظة للغاية . وتلتف شركات القدرة الكهربائية حول هذه المشكلة بطريقة لطيفة للغاية وذلك عند ملاحظة أن الكمية المهمة في تحديد القدرة هى VI وليست I بمفردها . ففى المثال السابق ، لو أن $V = 100{,}000$ V فإن :

$$(150 \text{ W})(100{,}000) = (100{,}000 \text{ V})(I)$$

$$I = 150 \text{ A}$$

وكما ترى فإن التيار المطلوب سيكون أقل بكثير فى هذه الحالة . كما أن النقل مرتفع الجهد ، قليل التيار له نتيجة هامة للغاية وهى أن الفاقد نتيجة التسخين فى كابلات (أسلاك) النقل سينخفض بشكل بالغ . ولعلك تذكر أن هذا الفقد فى القدرة يعتمد على **مربع التيار** (I^2R) بحيث أن خفض التيار ألف مرة (1000) يقلص القدرة المفقودة مليون مرة تقريبًا ! ! ولهذا تلجأ شركات القدرة الكهربائية إلى خطوط الجهد العالى (أو ما يشار إليه أحيانًا بخطوط الضغط العالى) عند نقل القدرة لمسافات بعيدة وقد يصل جهد النقل أحيانًا إلى ما يزيد على 500,000 V .

ومن الطبيعى ألا تُقدم الشركات على نقل هذا الجهد بأسلاك إلى المنازل مباشرة لأن خطر الصعق والحرائق سيكون مدمرًا . وبدلاً من ذلك فإن الشركات تلجأ إلى محولات خافضة فى المحطات الفرعية للتوزيع ومرة أخرى فى بعض المواقع المحلية لتحويل هذه الجهود إلى نحو 120 V .

كما يوجد بكثير من المنازل خطوط جهد 240 V أيضًا لأن بعض الأجهزة المنزلية الكبيرة (كمكيفات الهواء والمجففات والأفران) تعمل عادة بجهد مقداره 240 V بدلاً من 120 V وذلك لنفس السبب الذى يدفع شركات الكهرباء إلى استعمال الجهود العالية . ولابد أنك قادر على تفسير السبب فى أنه من الأفيد ماديًا تشغيل الأجهزة ذات الاستهلاك المرتفع من القدرة على جهد 240 V بدلاً من 120 V .

منظور حديث

الخواص المغناطيسية للموصلات الفائقة

لقد ناقشنا ظاهرة التوصيل الفائق فى القسم 13-18 ، كما درسنا فى الفصلين التاسع عشر والعشرين ، العلاقة بين التيارات والمجالات المغناطيسية وكيف يمكن للتيارات أن تُستحث بواسطة فيض مغناطيسى متغير . ويمكننا الآن جمع ما تعلمناه إلى بعضه البعض وفحص التبعات المغناطيسية للموصلة الفائقة .

لقد كان اختبار حلقة التيار الذى ابتكره أونيس لمعرفة ما إذا كانت مقاومة الموصل الرصاصي الفائق صفرًا أو لا كالتالي : وضعت حلقة الرصاص في مجال مغناطيسي ثم خفضت درجة حرارتها حتى 4.2 K وهي درجة الهليوم السائل (T_c للرصاص هي 7.2 K) ثم أبعدت الحلقة فائقة الموصلية عن المجال المغناطيسي مع استثارة تيار يميل إلى المحافظة على الفيض المغناطيسي الأصلي خلال الحلقة . وبمجرد خروج الحلقة من المجال المغناطيسي فإنه لا يمكن لأية ق.د.ك أن تستحث في الحلقة ومن ثم لابد للتيار من الاضمحلال أسيًا بثابت زمني مقداره $T_L = L/R$. وعند رصد المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار الحلقة المستحث ، فإن المراقب لابد أن يلحظ اضمحلال التيار حتى لو كان T_L كبيرًا جدًا (R صغيرة جدًا) لأن فترة الملاحظة يمكن أن تمتد لفترة طويلة . وكما ذكرنا في الفصل الثامن عشر فإن تيارات الحلقة قد دامت دون أى نقصان لسنوات عديدة ، مشيرة بذلك إلى أن R هي صفر في الواقع .

ثم اكتشف العالمان الألمان مايسنر و أوشنفيلد عام 1933 ، خاصية مغناطيسية جديدة ومدهشة للموصلات الفائقة ، وأصبحت تعرف **بتأثير مايسنر** . لقد وضعا كرة من الرصاص في مجال مغناطيسي خارجي ، ثم خفضا درجة حرارتها إلى ما دون T_c ، ومحتفظين بالكرة في المجال المغناطيسي . وبما أن هذه العملية لا ينشأ عنها أى تغير في الفيض المغناطيسي الخارجي ، فإن قانون فاراداى يتنبأ بأنه لن تتكون تيارات مستحثة . ومن العجيب - مع هذا - أنه عندما صارت المادة فائقة التوصيل ، فإن التيارات التى على سطح الكرة ألغت تمامًا وتلقائيًا المجال الخارجي بداخل المادة . وكان هذا دليلاً على أن الموصل الفائق يعتبر مادة ديامغناطيسية **مثالية** ; ولها إنفاذية مغناطيسية نسبية $K_m = 0$ (القسم 14-19) ومن الأهمية بمكان أن نكرر أن التيارات التى طردت المجال الخارجي في تأثير مايسنر **ليست** نتيجة للحث الذى درسناه في هذا الفصل . والمجال المغناطيسي قادر على اختراق باطن موصل ما ، حتى وإن كان موصلاً « كلاسيكيًا تامًا » . ويعد الاستبعاد التلقائي للمجال المغناطيسي الخارجي ، ظاهرة نوعية وغير متوقعة لحالة التوصيل الفائق .

ثم اكتشف فيما بعد أن تأثير مايسنر لا يرصد إلا بالنسبة لمجالات خارجية أقل من قيمة حرجة معينة . وبعبارة أخرى ، فإن المجالات المغناطيسية الخارجية القوية تستطيع تدمير حالة التوصيل الفائق والمجالات الخارجية الأقل من المجال الحرج تخفض من قيمة T_c بالنسبة لمادة ما . وبالنسبة للفلزات النقية ، فإن هذه المجالات صغيرة وتتراوح قيمها بين 5 إلى 200 mT . وقد حاول أونيس أن يمرر تيارات كبيرة في الموصلات الفائقة حتى يحصل على مجالات مغناطيسية ضخمة ; إلا إنه أدرك بسرعة أن المجالات المغناطيسية الداخلية التى تنشؤها هذه التيارات هي التى تصبح معها الموصلية الفائقة مستحيلة . على أن بعض الباحثين قد اكتشف فيما بعد أن هناك سبائك يدخل النيوبيوم في تركيبها ، يمكنها الاحتفاظ بخاصية التوصيل الفائق في مجالات تزيد على 15 T . وتعرف هذه السبائك وغيرها من السبائك ذات المجال الحرج المرتفع

بالنوع II من الموصلات الفائقة ، وقد استخدمت فى توليد والاحتفاظ بمجالات مغناطيسية تزيد بكثير عما يمكن توليده بأية طرق أخرى .

ولا يزال العديد من تطبيقات الموصلية الفائقة فى طور الإعداد . ومن تلك التطبيقات مولدات كهربائية وخطوط لنقل القدرة الكهربية وكلها فائقة التوصيل وذلك من أجل خفض الفاقد فى القدرة بسبب وجود مقاومة . وهناك أجهزة تسمى سكويد (SQUID) (والاسم مأخوذ من الحروف الأولى للكلمات التالية : أجهزة التداخل الكمية فائقة التوصيل) وهى قادرة على قياس تغيرات المجال المغناطيسى بدقة بالغة ، وهى تستخدم حاليًا لقياس الخرائط المغناطيسية المرتبطة بنشاط المخ والقلب ووظائف الأعضاء الأخرى . كما أن هناك ما يسمى **بوصلات جوزيفسون** التى تتيح قياسات بالغة الدقة (سبعة أرقام معنوية) للجهود الكهربية ، وهى تستخدم كمفاتيح ذات سرعات عالية جدًا فى العناصر المنطقية بالكومبيوتر . وسوف تنخفض تكلفة وسائل المواصلات المعلقة كالرفع المغناطيسى أو ماجليف) انخفاضًا كبيرًا ، إذا أمكن استعمال مواد فائقة التوصيل ولها درجات حرجة T_c مرتفعة حتى يمكن توليد المجالات المغناطيسية القوية المطلوبة .

ويبدو أن التوصيل الفائق سيستمر بالتأكيد فى لعب أدوار عملية ومتناهية الأهمية فى حياتنا . وقد ثبتت صحة هذا التوقع مع أغلب الظواهر التى توصلنا إلى فهمها نتيجة للبحوث الأساسية فى الفيزياء .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) ق.د.ك المستحثة ، (ب) الفيض المغناطيسى ، (جـ) قانون فاراداى ، (د) قانون لنز ، (هـ) المحاثة المتبادلة والذاتية ،(و) الثابت الزمنى الحثى ،(ز) ق.د.ك الحركية ،(ح) الجهد المتردد ،(ط) ق.د.ك العكسية ، (ى) المحول .

2 عندما تصادف حالة بسيطة تتضمن تغيرًا فى الفيض الذى يتخلل ملفًا ما ، أن تشرح بطريقة وصفية كيف تسلك ق.د.ك المستحثة وأن تحدد اتجاه التيار المستحث .

3 أن تطبق قانونى فاراداى ولنز على حالات بسيطة .

4 أن تشرح كيف تسلك ق.د.ك المستحثة فى محاثات متبادلة وذاتية . وأن تصف العوامل التى تؤثر على المحاثة المتبادلة .

5 أن ترسم رسمًا بيانيًا بين التيار والزمن لدائرة تتكون من ملف محاثة ومقاوم وبطارية كلها متصلة على التوالى وأن يبدأ الرسم من لحظة إغلاق الدائرة . وأن تبين الثابت الزمنى الحثى على الرسم البيانى .

6 أن تحسب الثابت الزمنى الحثى للدائرة المذكورة فى رقم (5) إذا علمت قيمتى L ، R . وأن تعين قيمة التيار فى الدائرة عند أية لحظة t بعد أن يغلق المفتاح .

7 أن تشرح وصفيًا سبب وجود ق.د.ك مستحثة بين طرفى موصل يقطع خطوط مجال مغناطيسى . وأن تحسب مقدار هذه القوة الدافعة الكهربية المستحثة لسلك طوله l ويتحرك عموديًا على المجال بسرعة مقدارها v .

8 أن ترسم شكلاً تخطيطيًا لمولد تيار متردد بسيط . وأن تشرح كيف يُنتج جهدًا ترددًا جيبيًا ، وعلى أية عوامل تعتمد سعة هذا الجهد وأن ترسم رسمًا بيانيًا بين الجهد والزمن .

9 أن تشرح لماذا تعتمد ق.د.ك العكسية لمحرك ما على السرعة الزاوية لعمود المحرك .

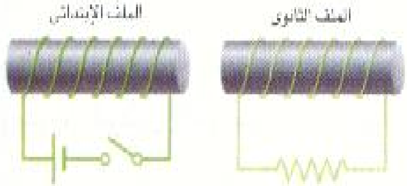
10 أن تشرح كيف يقوم المحول بتغيير الجهد المتردد . وأن تطبق معادلة المحول على مواقف بسيطة .

أسئلة وتخمينات

1 تستقر حلقتا تيار دائريتان فوق منضدة . والحلقة رقم 1 تشمل بطارية ومفتاح أما الثانية فهى مجرد عروة مقفلة من السلك . صف ما يحدث فى الحلقة رقم 2 عندما يغلق المفتاح فى الحلقة 1 فجأة ، وعندما يفتح فجأة (أ) عندما تتراكب الحلقتان و (ب) عندما لا تتراكبا . ارسم رسمًا بيانيًا للتيار مع الزمن فى كل حالة .

2 يحمل سلك طويل مستقيم تيارًا بامتداد سطح منضدة ، كما تستقر عروة مستطيلة من السلك فوق المنضدة . فإذا أطفئ التيار المار فى السلك المستقيم فجأة ، فما هوا تجاه التيار المستحث فى العروة ؟ ارسم رسمًا بيانيًا لعدة مواضع بالنسبة للسلك ، مبينًا فى كل حالة اتجاه التيار المستحث فى العروة .

3 تستقر حلقة نحاسية فوق منضدة . وكان هناك ثقب فى المنضدة عند مركز الحلقة . فإذا أُمسك مغناطيس رأسيًا بحيث كان قطبه الجنوبى مرتفعًا فوق المنضدة ثم أفلت ليسقط خلال الثقب ، فما هو وصف ق.د.ك المستحثة فى الحلقة والقوى التى تؤثر على المغناطيس .



شكل م 1–20

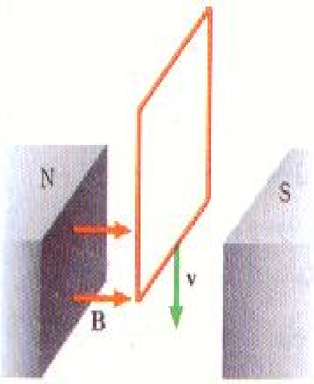
4 ماذا يحدث فى الملف الثانوى المبين بالشكل م 1–20 عندما يكون المفتاح المتصل مع دائرة الملف الابتدائى (أ) قد ضغط ليقفل و (ب) وقد جذب ليفتح ؟ أعد المسألة بالنسبة للشكل م 1–20 .

5 هب أن لديك ملفين مسطحين متماثلين تمامًا . كيف يمكن وضع الملفين بحيث تكون محاثتهما المتبادلة (أ) أكبر ما يمكن و (ب) أصغر ما يمكن ؟ وإذا وصل الملفان على التوالى بسلك مرن فكيف يجب أن يكون وضعهما حتى تكون المحاثة الذاتية : (جـ) أكبر ما يمكن ، (د) أصغر ما يمكن .

6 وضع ملف صغير بداخل ملف لولبى طويل . كيف تتغير المحاثة المتبادلة للملفين مع تغير اتجاه الملف ؟

7 وجهت أنبوبة نحاسية طويلة جدًا فى اتجاه رأسى . صف حركة قضيب مغناطيسى أسقط داخل الأنبوبة وهو فى وضع رأسى . لماذا يصل المغناطيس إلى سرعة نهائية ؟

8 ناقش إمكانية استخدام ق.د.ك . مستحثة فى الأقمار الصناعية حتى تتوافر الطاقة اللازمة للأجهزة الإلكترونية المختلفة عليه ، علمًا بأن الأقمار الصناعية تتحرك بسرعات كبيرة جدًا خلال المجال المغناطيسى للأرض .



شكل م 2–20

9 تتعرض عروة مقفلة من السلك لقوة إيقاف ضخمة عندما تسقط فى مجال مغناطيسى . برر هذه المقولة بالرجوع إلى الشكل م 2–20 . وهل يحدث نفس الشىء عندما تتأرجح قطعة مصمتة من فلز ما ومثبتة إلى خيط فى مجال مغناطيسى ؟ يعرف هذا التأثير العام بمصطلح **التخميد المغناطيسى** للحركة .

10 تستقر الحلقة المعدنية فى الشكل م 3–20 عند أحد طرفى ملف لولبى وتثبت فى ذلك الوضع ، ثم مرّر تيار متردد (بواسطة ق.د.ك مترددة) خلال الملف اللولبى ، فأصبحت الحلقة ساخنة . لماذا ؟ كما أن لوحًا معدنيا يصبح هو الآخر ساخنًا لو وضع

فوق الملف اللولبى . اشرح السبب فى أن التيارات الدوامية قد أستحثت فى هذا اللوح وجعلته يسخن .



شكل م 3–20

11 الحلقة المعدنية فى الشكل م 3–20 مصنوعة من النحاس ، أما الملف اللولبى فله قلب حديدى ، لكى يزيد مجاله المغناطيسى . وعندما يمر التيار فى الملف اللولبى فإن الحلقة المعدنية تطير إلى أعلى . اشرح ما يحدث . عليك بالعناية الخاصة فيما يتعلق بالاتجاهات .

12 تبذل المحركات ـ عادة ـ شغلاً على الأشياء الخارجية . اشرح بوضوح كيف تنتقل الطاقة من التيار الكهربى إلى الجزء الدوار من المحرك .

13 اشرح كيف تحول المولدات الكهربائية الشغل الميكانيكى إلى طاقة كهربية .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

وحدات الفيض (التدفق) المغناطيسى (Φ)

$$1 \text{ Weber (Wb)} = 1 \text{ T.m}^2$$

وحدات المحاثة (M أو L)

$$1 \text{ henry (H)} = 1 \text{ V.s/A}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

الفيض المغناطيسى (Φ)

الفيض المغناطيسى خلال مساحة A ما هو

$$\Phi = BA\cos\theta = B_{\perp}A$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين **B** والعمود القام على المساحة **n** .

قانون فاراداى للحث المغناطيسى

ق.د.ك المتوسطة المستحثة فى ملف به N لفة نتيجة لفيض مغناطيس متغير هى

$$\overline{\text{emf}} = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

قانون لنز

يكون اتجاه ق.د.ك المتوسطة المستحثة بحيث أن التيار المار فى اتجاه ق.د.ك يخلق مجالاً مغناطيسيًا يميل إلى معارضة (أو معاكسة) التغير الحادث فى الفيض الخارجى .

خلاصة :

1 لاحظ أن Wb/s = V .

2 يمكن للفيض خلال ملف أن يتغير بثلاث طرق :

(أ) بواسطة تغيرات فى المجال **B** المتخلل للملف .

(ب) بواسطة تغيرات فى مساحة الملف .

(جـ) بواسطة تغيرات فى الزاوية θ بين الملف و **B** .

المحاثة المتبادلة (M)

المحاثة المتبادلة M بين ملفين هى ثابت التناسب بين ق.د.ك المستحثة فى الملف الثانوى ومعدل تغير التيار فى الملف الابتدائى .

$$\overline{\text{emf}}_{\text{sec}} = -M\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)_{\text{prim}}$$

المحاثة الذاتية (L)

المحاثة الذاتية لملف ما هى ثابت التناسب بين ق.د.ك المستحثة فى الملف ومعدل تغير التيار فى الملف نفسه .

$$\overline{\text{emf}} = -L\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$$

خلاصة :

1 تعتمد المحاثة المتبادلة على تصميم الملفين واتجاههما النسبى .

2 المحاثة الذاتية لملف لولبى هى : $L_{\text{sol}} = \mu_0 N^2A/l = \mu_0 n^2Al$

حيث N هى العدد الكلى اللفات و l هو طول الملف اللولبى و A هى مساحة المقطع المستعرض للملف اللولبى .

و n هى عدد اللفات لكل متر من الطول .

3 إذا كان الملف اللولبى مملوءًا بمادة ذات إنفاذية مغناطيسية نسبية K_m فإن المعادلة السابقة يجب ضربها فى K_m .

دائرة متصلة على التوالى تحتوى على مقاوم وملف محاثة و ق.د.ك

عند قفل المفتاح فإن التيار ينمو فى الدائرة متبعًا العلاقة الرياضية التالية :

$$I(t) = I_f\,(1-e^{-t(L/R)})$$

حيث $I_f = \mathscr{E}/R$ هو التيار النهائى فى الدائرة .

خلاصة :

1 المقدار L/R له وحدات ثوانى ويسمى الثابت الزمنى الحثى τ_L للدائرة .

2 كلما زاد الثابت الزمنى ، كلما تباطأت الدائرة فى الاستجابة للقوة الدافعة الكهربية (ق.د.ك) المطبقة . وقيم L الكبيرة و / أو قيم R الصغيرة تجعل الثابت الزمنى كبيرًا .

الطاقة المختزنة فى ملف محاثة

الطاقة المختزنة فى ملف محاثة يحمل تيارًا I هى

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}LI^2$$

وإذا كانت L بوحدات هنرى والتيار بالأمبير فإن الطاقة (E) تكون بوحدات جول .

كثافة الطاقة فى مجال مغناطيسى

الطاقة فى وحدة الحجوم فى مجال مغناطيسى **B** فى الفراغ هى

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

خلاصة :

1 إذا ملئ الفراغ بمادة ذات إنفاذية مغناطيسية نسبية مقدارها K_m فإن μ_0 لابد أن تستبدل بها $K_m\mu_0$. ويسرى نفس الشىء على ملف المحاثة المحتوى على هذه المادة .

ق.د.ك الحركية

إذا تحرك موصل طوله l خلال منطقة بها مجال مغناطيسي منتظم **B** وبسرعة **v** عموديًا على طوله وعلى المجال فإن ق.د.ك تستحث بين طرفيه وتساوى :

$$\text{emf} = Bvl$$

خلاصة :

1 لابد أن يمتد المجال المغناطيسي المنتظم على طول القضيب l على الأقل .

2 إذا لم تكن **v** ، **I** ، **B** في تعامد متبادل فلابد من استخدام مركبتي **v** ، **B** المتعامدين مع **I** .

مولدات التيار المتردد

عندما يدور ملف مساحة مقطعه المستعرض A وعدد لفاته N ، بسرعة زاوية منتظمة في مجال مغناطيسي **B** مستعرض ، فإنه يولد جهدًا مستحثًا يعتمد على الزمن بالعلاقة الآتية :

$$V(t) = V_0 \sin^2 \pi f t$$

حيث $V_0 = 2\pi fNAB$ و f هو تردد الدوران (Hz) .

خلاصة :

1 يتردد الجهد الخارج من المولد من القيمة $+V_0$ إلى $-V_0$ مارًا خلال دورة ذات طور واحد في زمن دورى مقداره $1/f$ لدوران الملف .

المحولات

يتكون المحول من ملف ابتدائي وملف ثانوى ملفوفان (عادة) حول قلب حديدى وعندما تطبق ق.د.ك مترددة على الملف الابتدائي ، فإن ق.د.ك تستحث في الملف الثانوى وتعطى من معادلة المحول :

$$\frac{\text{ق.د.ك الثانوية}}{\text{ق.د.ك الابتدائية}} = \frac{N_s}{N_p}$$

حيث N_s هو عدد اللفات في الملف الثانوى ، N_p هو عدد اللفات في الملف الابتدائي .

مسائل

القسمان 1-20 و 2-20

1 وضعت عروة مستديرة من السلك نصف قطرها 20 cm بحيث كانت متعامدة مع مجال مغناطيسي شدته 0.2 T . أوجد الفيض المغناطيسي خلال مساحة العروة .

2 وضعت قطعة من الورق المقوى مسطحة ومستطيلة الشكل ، مساحتها $240\ cm^2$ في مجال مغناطيسي شدته 25 mT . وكان العمود المقام على سطح تلك القطعة يصنع زاوية θ مع خطوط المجال . أوجد الفيض المغناطيسي خلال المساحة إذا كان θ (أ) $0°$ و (ب) $30°$.

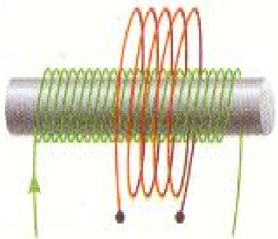
3 وضعت عروة مستديرة مسطحة مساحتها $1800\ cm^2$ في مجال مغناطيسي شدته 30 mT . وكان العمود المقام على مساحة العروة يصنع زاوية θ مع خطوط المجال . أوجد الفيض المغناطيسي خلال المساحة إذا كانت θ (أ) $0°$ ، (ب) $90°$ ، (ب) $30°$.

4 احسب فيض المجال المغناطيسي للأرض وشدته 5×10^{-5} T خلال عروة مربعة مسطحة مساحتها $25\ cm^2$ (أ) عندما يكون المجال متعامدًا مع مساحة العروة ، (ب) عندما يصنع المجال زاوية مقدارها $30°$ مع العمود المقام على مستوى العروة و (جـ) عندما يصنع زاوية مقدارها $90°$ مع العمود المقام على المستوى .

5 تستقر عروة مستطيلة مسطحة ، مساحتها $6\ cm \times 5\ cm$ في المستوى xy في منطقة بها مجال مغناطيسي منتظم شدته $0.6\ T$. وكانت خطوط المجال المغناطيسي تصنع زاوية مقدارها $40°$ مع محور z . أوجد الفيض المغناطيسي خلال مساحة العروة .

▪ 6 وضعت عروة مستديرة من السلك نصف قطرها R في مجال مغناطيسي منتظم شدته B ، ثم أديرت حول قطرها كمحور . أوجد الفيض المغناطيسي خلال مساحة العروة كدالة في الزمن ، إذا كان تردد الدوران هو f ، وعندما يكون محور الدوران (أ) متعامدًا مع المجال المغناطيسي و (ب) موازيًا للمجال .

▪ 7 يحمل ملف لولبي مجوف به 600 لفة وطوله 60 cm ، تيارًا شدته 4 A . وقد علقت داخل المنطقة المركزية للملف عروة من السلك مساحة مقطعها المستعرض A . ما مقدار الفيض الذي يتخلل العروة إذا كانت الزاوية المحصورة بين محور العروة ومحور الملف اللولبي (أ) $90°$ و (ب) $60°$ و (جـ) $0°$ ؟



شكل م 4-20

▪ 8 مساحة المقطع المستعرض للملف اللولبي في الشكل م 4-20 هي A_s ومساحة المقطع المستعرض للملف رقم 1 هي A_c . عندما يمر تيار خلال الملف اللولبي فإنه ينتج مجالاً مغناطيسيًا شدته 30 mT بداخل الملف وشدته صفر تقريبًا خارجه . وليس هناك تيار في الملف رقم 1 . احسب الفيض المغناطيسي خلال كل لفة من (أ) الملف اللولبي و (ب) الملف رقم 1 .

القسمان 3-20 و 4-20

9 تتغير شدة المجال المغناطيسي في ملف ذي لفة واحدة ، مساحة مقطعه المستعرض $40\ cm^2$ من 6 إلى 9.6 mT على مدى 0.5 s . أوجد متوسط ق.د.ك المستحثة في الملف .

10 يتغير الفيض المار خلال عروة مستديرة بها لفتان بمعدل 6 Wb/s . أوجد ق.د.ك المستحثة في العروة .

11 وضع ملف مستدير به خمس لفات وقطره 50 cm في مجال مغناطيسي خارجي شدته 0.4 T بحيث كان المجال المغناطيسي متعامدًا مع مستوى الملف . ثم سحب الملف من المجال في غضون 0.2 s أوجد ق.د.ك المستحثة المتوسطة خلال هذه الفترة .

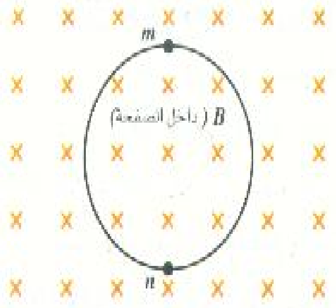
12 يستقر ملف مربع به 20 لفة وطول ضلعه 4.0 cm مسطحًا في مقابل القطب الشمالي لمغناطيس كهربي كبير . ثم أزيد التيار في المغناطيس الكهربي ببطء بحيث ارتفاع المجال المغناطيسي من صفر إلى 0.5 T في 4.0 s . (أ) أوجد متوسط ق.د.ك المستحثة في الملف أثناء تغيير التيار . (ب) إذا نظرت باتجاه القطب الشمالي فهل تكون ق.د.ك في الملف في اتجاه حركة عقارب الساعة أم في عكس اتجاه عقارب الساعة ؟

13 صمم ملف مسطح مربع به 200 لفة وطول ضلعه 6.0 cm بحيث يمكنه الدوران بزاوية $90°$ في 0.2 s . وقد وضع الملف في مجال مغناطيسي بحيث كان الفيض المغناطيسي خلاله صفرًا . وعندما دار الملف خلال $90°$ بحيث صار الفيض عند حده الأقصى ، فإن الجهد المتوسط بالملف نتيجة ق.د.ك المستحثة هو 0.4 mV . ما هي شدة المجال المغناطيسي ؟

14 وضع ملف مسطح به 400 لفة مستديرة وقطره 20 cm بحيث كان محوره موازيًا للمجال المغناطيسي للأرض . ثم حرك الملف بسرعة بحيث صار محوره متعامدًا مع المجال المغناطيسي للأرض في فترة 0.2 s . فإذا استحثت فولطية مقدارها المتوسط 1.44 mV في الملف ، فما هو مقدار المجال المغناطيسي للأرض ؟

15 يحاول طالب في إحدى التجارب المعملية أن يقيس المجال المغناطيسي للأرض عن طريق توصيل طرفي عروة مربعة مسطحة أفقيًا وطول ضلعها 0.8 cm بطرفي فولتميتر حساس . ثم يحرك العروة في اتجاه موازٍ للأرض بسرعة مقدارها 4 m/s . (أ) إذا كانت المركبة الرأسية لمجال الأرض هي $5 \times 10^{-5}\ T$ فكم تكون قراءة الفولتميتر ؟ (ب) افترض أن الطالب انتزع الملف بعيدًا في 1.0 s ، فكم يكون مقدار ق.د.ك المتوسطة المستحثة في العروة ؟

■ 16 تبلغ مساحة عروة السلك المرنة في الشكل م 5-20 $100\ cm^2$ وهـي موجـودة فـي مجـال مغناطيسي شدتـه $0.80\ mT$. وعندما يمسك الطالب بالعروة بشدة مـن النقطتين m و n ويجذبهما قطريًا إلى الخارج بشدة حتى تنطبق العروة وتصبح خطًا مستقيمًا في $0.12\ s$. ما هو متوسط ق.د.ك المستحثة في الملف أثناء هذه العملية ؟

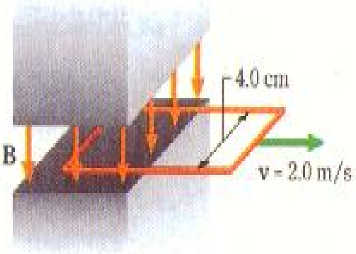


شكل م 5-20

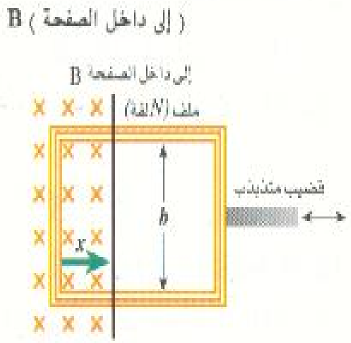
■ 17 تستحث ق.د.ك مقدارها $64\ \mu V$ في العروة المبينة في الشكل م 5-20 إذا أديـرت فجأة حول محور يمر بالنقطتين m و n بزاوية مقدارها $90°$ فـي $0.16\ s$. كـانت مساحة العروة $40\ cm^2$. (أ) مـا هـو مقدار المجـال المغناطيسـي ؟ (ب) مـا هـو متوسط ق.د.ك إذا أدير الملف $180°$ في نفس الفترة الزمنية ؟

■ 18 ملف لولبي به 400 لفة وقطره $12\ cm$ ينتج بداخله مجال مغناطيسي شدته $0.3\ T$. ما هي الفترة الزمنية التي يجـب أن يتغير المجال داخل الملف فيها من هذه القيمة إلى الصفر إذا كان مقدار متوسط ق.د.ك المستحثة خلال هذه الفترة الزمنية $6\ kV$.

■ 19 وضع ملف دائري مسطح به 60 لفة من السلك في مجال مغناطيسي بحيث صنع العمود المقام علـى مسـتوى الملـف زاويـة مقدارها $40°$ مع خطوط المجال المغناطيسي . وعندما زيد مقدار المجال المغناطيسي بالتدريج من 0.2 إلى $0.7\ mT$ في زمـن قدره $0.5\ s$ فإن ق.د.ك مقدارها $90\ mV$ تستحث في الملف . ما هو الطول الكلي للسلك المستخدم في صناعة هذا الملف ؟



■ 20 جُذبـت العـروة السـلكية المبينـة فـي الشـكـل م 6-20 إلى خـارج المجـال المغناطيسي بسرعة ثابتة . فـإذا كـان المجـال منتظمًا وشدتـه $2.0\ mT$ فـي المنطقة المبينة . وصفر فيما عدا ذلـك ، (أ) مـا هـي ق.د.ك المستحثة فـي العروة و (ب) ما هو اتجاهها .



شكل م 7-20

■ 21 كثيرًا ما تستخدم أجهزة استشعار مغناطيسية للكشف عن الذبذبات الصغيرة ويتم ذلك - مثلاً - بتوصيل طرف قضيب متذبذب بملف يتأرجح داخل وخارج مجال مغناطيسـي منتظم **B** كما هـو مبين في الشكل م 7-20 . إثبت أن ق.د.ك المستحثة في الملف يمكن التعبير عنها بدلالة السرعة التي يتحرك بها طـرف القضيب المتذبذب v ؛ $emf = NBbv$.

■ 22 تبلغ قيمة متوسط المجال الذي ينتج داخل ملف لولبي ما $0.8\ T$. وقد تم لف ملف ثانوي به 120 لفة فوق الملف اللولبـي . فإذا كانت مساحة المقطع المستعرض للملف اللولبي $0.6\ cm^2$. ما هـو مقدار ق.د.ك المستحثة فـي الثـانوي إذا انخفـض المجال داخل الملف اللولبي من قيمته المذكورة إلى الصفر في $0.020\ s$ ؟

■ 23 يدخل قضيب مغناطيسي ويخرج داخل ملف به 240 لفة ، ويحتويه الملف بإحكام . وعندما رفع المغناطيس إلى أعلى ثم أدخل بالملف في غضون $0.36\ s$ فإن ق.د.ك متوسطة مقدارها $0.40\ V$ تستحث فـي الملـف . فـإذا كـانت مسـاحة المقطـع المستعرض للمغناطيس $3.0\ cm^2$ ، أوجد مقدار المجال المغناطيسي B .

■ 24 في الشكل م 4-20 كان نصف قطر الملف رقم 1 هو b ونصف قطر الملف الولبي هو a . والملف اللولبـي أطـول كثـيرًا فـي الواقع عما هو مرسوم في الشكل (أ) . ما مقدار ق.د.ك المستحثة في الملف رقم 1 إذا كان المجال المغناطيسي فـي الملـف

اللولبي يتغير بمعدل مقداره 0.040 T/s ، علمًا بأن هذا الملف به N لفة ، بينما بالملف اللولبي n عروة في المتر من طوله ؟ (ب) ما هي ق.د.ك المستحثة في الملف إذا أدخل قضيب حديدي إنفاذيته المغناطيسية النسبية هي $K_m = 200$ ، إلى داخل الملف اللولبي فملأه تمامًا ؟

25 يتزايد التيار المار في ملف لولبي ذي قلب هوائي بمعدل مقداره 1.5 A/s . وكان بالملف اللولبي 10^6 لفة لكل متر من طوله ، بينما كانت مساحة المقطع المستعرض له هي $2.0\ cm^2$ ..ثم أضيفت لفات ملف ثانوي مقدارها 10^4 لفة فوق لفات الملف اللولبي . ما هو مقدار ق.د.ك المستحثة في الملف الثانوي ؟

26 استُخدم نفس القلب الحديدي للف ملفين بشكل محكم وجنبًا إلى جنب على ذلك القلب . ومساحة المقطع المستعرض لكلا الملفين $5.0\ cm^2$. وعندما يمر تيار مقداره 1.8 A في الملف الابتدائي يتكون مجال مغناطيسي مقداره $B = 0.40\ T$ في القلب . وكان الملف الثانوي يحتوي على 120 لفة . (أ) ما هو مقدار ق.د.ك المستحثة في الثانوي إذا انخفض التيار في الابتدائي بانتظام من هذه القيمة إلى الصفر في زمن مقداره 0.050 s ؟ (ب) ما هي المحاثة المتبادلة للملفين ؟

القسم 5–20

27 بلغت محاثة ملف لولبي هوائي القلب وطوله 25 cm وقطره 2.0 cm ، 0.2 mH . ما هو عدد اللفات في هذا الملف اللولبي ؟

28 يرتفع التيار في ملف لولبي محاثته 4 mH من 0.4 A إلى 2.0 A في 0.4 s . ما هو متوسط ق.د.ك المستحثة في الملف أثناء هذا الزمن ؟

29 ما هو مقدار الفيض المغناطيسي خلال كل لفة من لفات الملف البالغة 400 لفة ومحاثته 8 mH عندما يمر به تيار مقداره 12 mA ؟

30 لدينا ملف لولبي به 500 لفة ونصف قطره 2.0 cm وطوله 25 cm . (أ) ما هي محاثة الملف اللولبي ؟ (ب) أوجد المعدل الذي يتغير به التيار المار في الملف اللولبي حتى يؤدي إلى ق.د.ك مقدارها 72 mV .

31 بالإشارة إلى المسألة رقم 30 ، أوجد معدل تغير الفيض المغناطيسي خلال مساحة المقطع المستعرض لملف لولبي في اللحظة التي تبلغ فيها ق.د.ك 72 mV .

32 ما هو معدل تغير التيار في ملف محاثة مقداره 40 mH عندما تكون ق.د.ك المستحثة عبر الملف هي 0.020 V ؟

القسم 6–20

33 إثبت أن وحدات الثابت الزمني الحثي $\tau = L/R$ هي الثواني .

34 وصِّل ملف محاثته 40 mH ومقاومته 16 Ω ببطارية قوتها 24 V وذات مقاومة داخلية مهملة . ما هو الثابت الزمني للدائرة ؟

35 وصلت بطارية قوتها 6 V على التوالي مع مقاوم وملف محاثة . وكان الثابت الزمني للدائرة $500\ \mu s$ والتيار الأقصى بها 360 mA . ما هي قيمة المحاثة ؟

36 طبق فرق جهد مقداره 60 V فجأة على ملف محاثته 15 mH ومقاومته 10 Ω وذلك بقفل مفتاح . أوجد (أ) التيار الأولي والمعدل الأولي لتغير التيار . (ب) مقدار التيار عندما يكون معدل تغير التيار هو 2000 A/s و (جـ) التيار النهائي ومعدل تغير التيار .

37 وصل ملف محاثة 30 mH على التوالي مع مقاوم 10 Ω وبطارية 9 V . وقد قفل المفتاح عند اللحظة $t = 0$. أوجد فرق الجهد عبر المقاوم (أ) عندما $t = 0$ و (ب) بعد زمن يساوي نصف الثابت الزمني و (جـ) بعد مرور زمن يساوي الثابت الزمني .

38 أوجد فرق الجهد عبر ملف المحاثة في المسألة رقم 37 (أ) عندما $t = 0$ و (ب) بعد مرور ثلث الثابت الزمني و (جـ) بعد مرور ثابت زمني واحد .

▪ 39 وصل ملف محاثة به 300 لفة ونصف قطره 4 cm وطوله 25 cm على التوالى مع مقاوم 1 kΩ وبطارية 12 V . أوجد التيار المار فى الدائرة . (أ) بعد ثابت زمنى واحد و (ب) بعد مرور ثابتين زمنيين .

القسم 7-20

40 ما مقدار الطاقة المختزنة فى ملف محاثة 50 mH عند اللحظة التى يكون التيار فيها 3 A ؟

41 احسب الطاقة المختزنة فى المجال المغناطيسى لملف لولبى به 400 لفة ، يمر فيها تيار مقداره 2 A ، يخلق فيضًا مغناطيسيًا 0.4 mWb فى كل لفة .

42 ملف محاثة 2 mH يحمل تيارًا مقداره 0.5 A . ما مقدار الطاقة المختزنة فى مجال ملف المحاثة ؟ ما مقدار الفاقد فى الطاقة إذا كانت مقاومة الملف 2 Ω ؟

▪ 43 محاثة ذاتيى مقدارها 24 mH تحمل تيارًا مقداره 3 A . (أ) ما مقدار الطاقة المختزنة فى المحاثة ؟ (ب) وإذا كانت هذه الطاقة مختزنة فى $3.0\ cm^3$ من الهواء فما هى القيمة المتوسطة للمجال المغناطيسى B فى الهواء ؟

▪ 44 ملف لولبى ملفوف حول قلب خشبى بانتظام بحيث كان حجم الملف اللولبى من الداخل $24\ cm^2$. وعندما يمر تيار مقداره 0.50 A فى الملف اللولبى فإن المجال المغناطيسى بداخله يكون 0.80 T . (أ) ما هو مقدار الطاقة فى وحدة الحجوم من المجال المغناطيسى ؟ (ب) ما مقدار الطاقة المختزنة فى الملف اللولبى ؟ (جـ) ما هى المحاثة الذاتية للملف اللولبى ؟

▪ 45 وصل مقاوم 10 Ω وملف محاثة 20 mH على التوالى مع بطارية 12 V . ما مقدار الطاقة المختزنة فى ملف المحاثة عندما (أ) يصل التيار إلى حده الأقصى ، (ب) يمر ثابت زمنى واحد بعد قفل المفتاح ، و (جـ) بعد مرور ثابتين زمنيين بعد قفل المفتاح ؟

القسم 8-20

46 تسير سيارة بسرعة مقدارها 25 m/s فى منطقة تبلغ المركبة الرأسية للمجال المغناطيسى للأرض فيها 3.0×10^{-5} T . ما هو مقدار فرق الجهد المستحث بين طرفى أحد محورها التى طول كل منها 2.0 m ؟

47 تتحرك شاحنة جنوبًا بسرعة مقدارها 30 m/s فى موقع تبلغ فيه المركبة الرأسية للمجال المغناطيسى للأرض 5.0 μT . أوجد ق.د.ك المستحثة فى الهوائى الرأسى للشحنة والذى يبلغ طوله 1.2 m .

▪ 48 أسقط قضيب معدنى طوله متر واحد يتخذ اتجاه شرق - غرب من ارتفاع 15 m على مكان كانت فيه المركبة الأفقية للمجال المغناطيسى للأرض 5.0×10^{-5} T . ما مقدار ق.د.ك المستحثة بين طرفى القضيب قبل أن يصطدم بالأرض مباشرة ؟

49 تحلق طائرة معدنية تبلغ المسافة بين طرفى جناحيها 30 m أفقيًا باتجاه الغرب وبسرعة مقدارها 250 m/s فى موقع تبلغ فيه المركبة الرأسية السفلى للمجال المغناطيسى للأرض 0.8×10^{-4} T . (أ) ما هو فرق الجهد بين طرفى الجناحين ؟ ، (ب) أى طرفى الجناحين يكون سالبا ، الجنوبى أم الشمالى ؟ ، (جـ) هل يمكن قياس هذا الجهد ؟ وإذا كان ممكنًا فكيف ؟

50 يخطط مهندس لكى ينير محطة قطارات باستخدام ق.د.ك المستحثة فى محاور القطارات التى تجرى على القضبان . (أ) إذا كانت المركبة الرأسية إلى أسفل للمجال المغناطيسى للأرض 0.6 G والمسافة بين القضبان 1.5 m ، فما هو مقدار ق.د.ك المتولدة بين القضيبين عند مرور قطار يسير بسرعة مقدارها 40 m/s ؟ (ب) هل يمكن استغلال هذا الجهد على القطار نفسه ؟ (جـ) وهل يمكن استغلاله فى محطة القطارات الواقعة عند الطرف البعيد للقضبان ؟ اشرح إجاباتك على الجزءين (ب) و (جـ) .

▪ 51 يستقر قضيب معدنى طوله 1 m داخل طائرة حيث يوجد مجال مغناطيسى شدته 6.0×10^{-3} T . ويميل محور القضيب بزاوية مقدارها 60° مع اتجاه المجال ويتحرك القضيب متعامدًا مع الطائرة بسرعة مقدارها 1.6 m/s . ما هى ق.د.ك المستحثة بين طرفى القضيب ؟

▪ 52 افترض أن السرعة التي تجذب بها العروة المذكورة في الشكل م 6–20 هي $v = 3$ m/s . وكان عرض العروة $d = 5$ cm ، والقيمة الثابتة للمجال المغناطيسي هي $B = 10$ G بين القطبين وصفر في أي موقع آخر . (أ) أوجد ق.د.ك المستحثة في العروة . (ب) إذا كانت مقاومة العروة هي $R = 8\ \Omega$ فما هو التيار المار فيها عند اللحظة المبينة ؟ (جـ) ما مقدار القوة الواجب جذب العروة بها حتى تظل سرعة حركتها ثابتة ؟

القسمان 9–20 و 10–20

53 يدور ملف مكون من 300 لفة مساحة كل منها $5.0\ cm^2$ بتردد مقداره 120 لفة في الثانية وفي مجال مغناطيسي شدته 0.040 T . اكتب الجهد المستحث في الملف على الصورة $V = V_0 \sin \omega t$.

54 ملف منفرد يدور في مجال مغناطيسي ويخلق جهدًا مقداره $V = 40 \cos (1000\ t)$. ما هو تردد دوران الملف وأقصى جهد ناتج عن هذا ؟

55 يدور ملف به 150 لفة ومساحته $100\ cm^2$ بتردد مقداره 45 rev/s في مجال مغناطيسي . فإذا كانت ق.د.ك المستحثة القصوى في الملف هي 5.0 V . فما هو مقدار شدة المجال المغناطيسي ؟

56 يدور ملف مولد به 300 لفة ومساحته $400\ cm^2$ في مجال مقداره 40 mT ما هي السرعة مقدرة بعدد اللفات في الثانية - التي يجب أن يدور بها الملف لتوليد جهد أقصى مقداره 2.0 V ؟

67 يدور ملف مربع الشكل طول ضلعه 20 cm وبه 100 لفة حول محور رأسي بسرعة تبلغ 2400 rev/m في موقع كانت المركبة الأفقية للمجال المغناطيسي للأرض فيه 2 G . أوجد أقصى ق.د.ك مستحثة في الملف بسبب المجال المغناطيسي للأرض .

▪ 58 يدور الملف المستطيل المحتوي على 500 لفة وأبعاده 20 cm × 10 cm لمولد ما بسرعة 120 rev/s في مجال مغناطيسي مقداره 0.8 T . (أ) ما هي أقصى ق.د.ك مستحثة في الملف ؟ ، (ب) ما هي القيمة اللحظية لهذه القوة الدافعة الكهربية في الملف عند $t = (\pi/30)$ s ؟ إذا اعتبرنا أن ق.د.ك تكون صفرًا عند $t = 0$ فما هي ، (جـ) أصغر قيمة للزمن t عندما تصل ق.د.ك إلى أقصى قيمة لها ؟

59 تبلغ مقاومة ملف في محرك ما 5 Ω . وعندما يعمل المحرك عند السرعة المقررة له فإنه يسحب تيارًا مقداره 4.0 A من المصدر الذي جهده 120 V . (أ) ما مقدار ق.د.ك المضادة بالمحرك ؟ (ب) ما هو التيار الذي قد يسحبه المحرك إذا توقف عن الدوران ؟

60 يعمل محرك مقاومة ملفه 20 Ω باستخدام مصدر للجهد مقداره 240 V . وعندما يعمل المحرك بأقصى سرعة له فإن ق.د.ك المضادة تكون 105 V . أوجد التيار المار في الملف (أ) عندما يدار المحرك لأول مرة و (ب) عندما يصل المحرك إلى أقصى سرعة له .

61 إذا كان التيار المار في المحرك المذكور في المسألة السابقة هو 6 A . فما هي ق.د.ك المضادة في تلك الحظة ؟

▪ 62 يكون التيار المار في ملفات محرك ما 12 A عندما يدار لأول مرة ويكون 4 A عندما يدور عند أقصى سرعة له . ويعمل هذا المحرك بجهد مقداره 120 V . أوجد ق.د.ك المضادة في الملف وكذا مقاومة الملف .

▪ 63 تحتاج المحركات الكبيرة إلى نحو دقيقة حتى تصل إلى سرعتها بعد بدء التشغيل وقد كانت مقاومة أحد هذه المحركات 1.2 Ω ويسحب تيارًا مقداره 10 A من مصدر جهده 120 V في المعتاد . (أ) ما مقدار المقاومة (وتسمى مقاومة البدء) الواجب توصيلها على التوالي مع المحرك إذا لم يكن يراد له أن يسحب أكثر من 20 A عند بدء التشغيل ؟ (ومن الطبيعي أن تزال هذه المقاومة بعد ذلك) . (ب) ما هي ق.د.ك العكسية لهذا المحرك عندما يعمل عند السرعات المعتادة ؟

القسم 11-20

64 يقوم محول معين فى جهاز راديو بتحويل الجهد المتردد من 120 V إلى 6 V . (أ) ما هى النسبة بين اللفات N_p / N_s بالنسبة لهذا المحول ؟ (ب) وصِّل هذا المحول بطريق الخطأ عكسيًا . ما هو الجهد عند الخرج بالتقريب قبل أن يحترق كل شيء ؟

65 يستعمل محول فى أحد إعلانات النيون لكى يحول الجهد المتردد من 120 V إلى 16,800 V . (أ) ما هى النسبة بين عدد اللفات N_p / N_s للمحول ؟ (ب) إذا وصِّل المحول بطريقة عكسية (أى 120 V متصلة بالملف الثانوى) فما هو الجهد الذى يظهر بالملف الابتدائى ؟

66 يقوم محول فى محطة توزيع بخفض الجهد المتردد من 36.000 V إلى 2400 V . وكان بالملف الابتدائى 15.000 لفة . (أ) ما هو عدد لفات الملف الثانوى ؟ (ب) إذا كان التيار فى الملف الثانوى هو 500 A . فما هو التيار فى الملف الابتدائى ؟ اعتبر أنه لا يوجد فقد فى القدرة .

67 التيار الابتدائى فى محول مثالى (لا يوجد فقد فى القدرة) هو 15,0 A عندما يكون الجهد الابتدائى 90 V . احسب الجهد عبر الثانوى عندما يكون التيار المسحوب منه هو 0.9 A .

68 تستعمل آلة لحام تيارًا مقداره 360 A . ولهذه الآلة محول بملفه الابتدائى 720 لفة ويسحب تيارًا مقداره 4.0 A من خط للقوى يوفر 240 V . (أ) ما عدد اللفات فى الثانوى ؟ (ب) ما هو الجهد الخارج عبر الثانوى ؟ اعتبر عدم وجود فقد فى القدرة فى المحول .

■ 69 يحتوى الملف الابتدائى لمحول ما على 200 لفة والثانوى على 80 لفة ، ويوصل ملفه الابتدائى بخط قدره جهده 120 V . وكان التيار فى الابتدائى هو 0.25 A عند توصيل بصيلة إضاءة بالثانوى . أوجد مقاومة البصيلة . اعتبر عدم وجود فقد فى القدرة فى المحول .

مسائل إضافية

■ 70 يحمل ملف لولبى به 500 لفة وطوله 25 cm ونصف قطره 2.0 cm تيارًا مقداره 4 A . وقد تم لف ملف آخر به 5 لفات بإحكام حول الملف اللولبى بحيث كان له نفس القطر الذى للملف اللولبى . (أ) أوجد التغير فى الفيض المغناطيسى خلال الملف و (ب) مقدار ق.د.ك المستحثة المتوسطة فى الملف عندما يزيد التيار فى الملف اللولبى إلى 10 A فى زمن قدره 1.2 s .

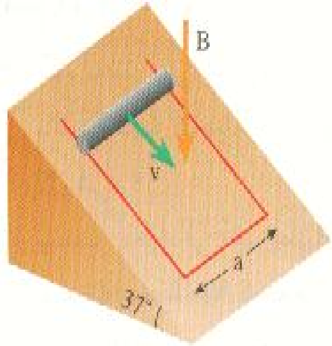
■ 71 تستحث ق.د.ك مقدارها 20 mV فى ملف لولبى به 400 لفة فى اللحظة التى يكون فيها التيار خلال الملف 4 A ويتغير بمعدل يبلغ 12 A/s . احسب الفيض المغناطيسى خلال كل لفة من لفات الملف الابتدائى .

■■ 72 ملف لولبى طويل ذو قلب حديدى ويحتوى على 2400 لفة ومساحة مقطعه المستعرض $4.0\ cm^2$. وعندما يمر تيار مقداره 4.0 A خلال الملف اللولبى فإن المجال المغناطيسى داخل الملف اللولبى يصبح $B = 0.60$ T . (أ) احسب ق.د.ك المستحثة المتوسطة فى الملف اللولبى إذا انخفض التيار إلى الصفر فى زمن قدره 0.2 s . (ب) ما هى المحاثة الذاتية للملف اللولبى ؟

■■ 73 تتصل محاثتان L_1 و L_2 معًا على التوالى . إثبت أن المحاثة المكافئة للمجموعة L_e تعطى بالعلاقة $L_e = L_1 + L_2$.
تلميح : فرق الجهد الكلى عبر ملفى المحاثة هو مجموع ق.د.ك المستحثتين فى كل من الملفين ، ومعدل تغير التيار هو نفسه فى كل من ملفى المحاثة .

■■ 74 إثبت أن المحاثة المكافئة لملفى المحاثة L_1 و L_2 المتصلين على التوازى يعطى بالعلاقة $1/L_e = 1/L_1 + 1/L_2$. تلميح : يتطلب قانون كيرتشوف أن تكون القوتان الدافعتان الكهربيتان متساويتين وأن يكون التيار الكلى هو مجموع التيارين المنفصلين .

■■ 75 ينزلق القضيب الهوائى المعدنى فى الشكل م 8–20 نحو أسفل المنحدر بينما يتواجد مجال مغناطيسى هو $B = 2.5$ T . (أ) أوجد ق.د.ك المستحثة عندما تكون سرعته $V = 20$ m/s . (ب) فإذا كانت مقاومة العروة $R = 25\ \Omega$. فما هو التيار المار فى العروة ؟ (جـ) هل يمر التيار فى اتجاه حركة عقارب الساعة أم ضد حركتها ؟ (د) ما مقدار القوة المؤثرة فى اتجاه أعلى للمنحدر ، على القضيب بسبب التيار وفى وجود المجال المغناطيسى ؟ (هـ) هل تميل هذه القوة إلى الإبطاء أم الإسراع فى حركة القضيب ؟



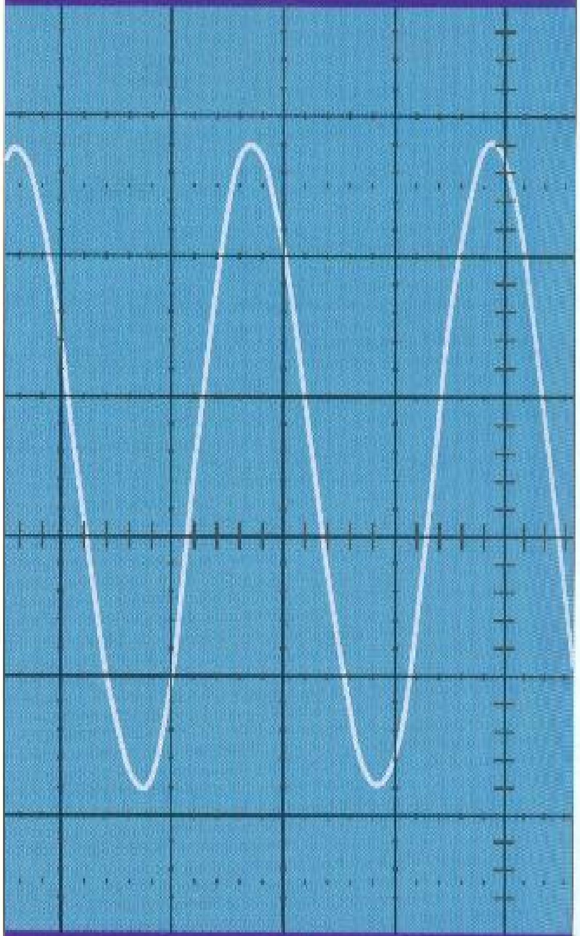
شكل م 8–20

■■ 76 بالنسبة للمسألة السابقة الموضحة فى الشكل م 8–20 أوجد السرعة النهائية للقضيب عندما ينزلق بدون احتكاك إلى أسفل المنحدر . تبلغ كتلة القضيب $m = 36$ g ومقاومة العروة صفر تقريبًا ، أما مقاومة القضيب فهى $25\ \Omega$.

■■ 77 للعروة المربعة المبينة فى الشكل م 2–20 مقاومة مقدارها $20\ \Omega$ ، وطول ضلعها 4.0 cm وكتلتها 15 g . فإذا كان مقدار المجال المغناطيسى هو 2.4 T بين القطبين وصفر فيما عدا ذلك ، فأوجد السرعة النهائية للعروة عند دخولها المنطقة الواقعة بين القطبين . اعتبر أن العروة تقع فى الموضع المبين عندما تكون قد وصلت إلى سرعتها النهائية .

■■ 78 تبلغ مقاومة سلك من النحاس (رقم 10) $5.2 \times 10^{-3}\ \Omega$/m ويستطيع هذا السلك حمل تيار مقداره نحو 30 A فقط دون حدوث تسخين زائد . وترغب إحدى شركات توزيع القوى الكهربائية فى استخدام هذا النوع من السلك لتوصيل قدره تبلغ 36 MW إلى مدينة تبعد 50 km من محطة توليد . ما هى نسبة القدرة المرسلة من المحطة والتى تفقد عبر خطوط النقل إذا كان الجهد المنقول هو (أ) 240 V و (ب) 12,000 V . اعتبر أن الحد المسموح به وهو 30 A لا يتم تجاوزه .

الفصل الحادى والعشرون



دوائر التيار المتردد

لقد انصب اهتمامنا الرئيسى فى الفصول القليلة السابقة على التيارات المستمرة ، أى التى تسرى الشحنات فيها بشكل دائم فى نفس الاتجاه . على أننا درسنا فى الفصل العشرين أن مصدر الجهد ذا القطبية المتردد ، يمكن الحصول عليه عند إدارة ملف فى مجال مغناطيسى . ومثل مصدر الجهد المتردد هذا هو الذى ينتج التيارات المترددة . وهى بدورها ذات أهمية عظيمة . وسوف ندرس فى هذا الفصل كيفية سلوك هذه التيارات عندما تسرى خلال مقاومات ومكثفات ومحاثات .

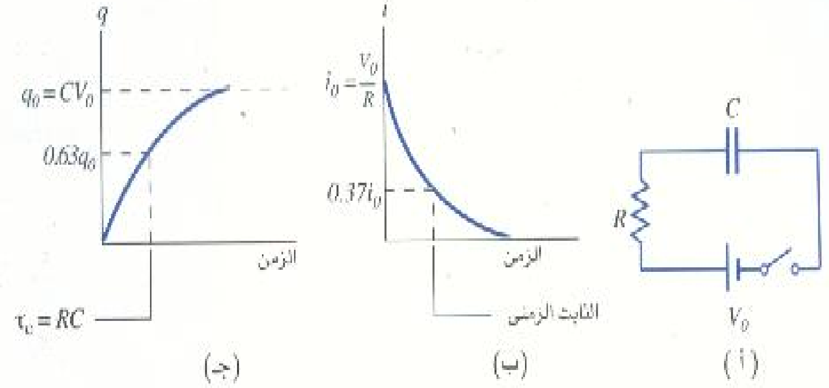
21-1 شحن وتفريغ مكثف

إن فهم سلوك دوائر التيار المتردد يستدعى أن نعرف كيف يستجيب التيار المار خلال عناصر الدائرة للتغيرات المستمرة فى مصدر ق.د.ك ونعرف أنه ليس هناك تأخر زمنى بين تطبيق جهد V عبر مقاوم نقى وتكون تيار $I = V/R$ خلال المقاوم . وبعبارة أخرى فإن ، **التيار والجهد فى مقاوم ما يخضعان لقانون أوم لحظيًا .**

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} \qquad \text{(مقاوم نقى)} \qquad (21\text{-}1)$$

لقد درسنا فى الفصل السابق الطريقة التى ينمو التيار بها مع الزمن عندما يغلق المفتاح الذى يوصل مصدر الجهد بملف محاثة . وقد وجدنا أن هناك تأخيرًا فى الزمن يمر قبل أن يصل التيار إلى القيمة النهائية التى يحددها قانون أوم . ولعلنا لذلك نتوقع أنه إذا كان الجهد المطبق على الدائرة فى تغير دائم ، فإن التيار هو الآخر سيظل « يطارد »

الجهد ، وعليه فإن قانون أوم لن يكون متبعًا فى كل لحظة . وهذا فـى الواقـع هـو لـب المسألة وسنتابع الموضوع بتفصيل أكبر فى أقسام تالية .



شكل 1-21:
يعتبر الثابت الزمنى τ_c مقياسًـا مناسـبًا للزمن الذى يستغرقه مكثف لكى يشحن أو يفرغ .

والمكثف هو عنصر الدائرة الوحيدة الذى لا زلنا فى حاجة لفحص سلوكه المعتمد على الزمن . فالمكثف كما نعلم لا يسـمح بمـرور التيـار المسـتمر . إلا أن شحـن وتفريـغ مكثـف مـا يستلزم حركة شحنات من وإلى لوحى المكثف . ونقل هـذه الشحنـات عـبر الدائـرة المحتويـة على مكثف ، يمثل تيارًا انتقاليًا . وسنفحص هذا السلوك بالرجوع إلى الدائرة البسيطة المبينـة فى الشكل 1-21 (أ) . افترض أن المفتاح مفتوح فى البدايـة وأنـه لا توجـد شحنـات علـى المكثف الذى يرمز لسعته بالرمز C . ونأمل فى معرفة ما يحدث عند إغلاق المفتاح فجأة .

عند إغلاق المفتاح فإن البطارية ستحاول إرسال شحنات فى اتجاه مع حركة عقارب الساعة حول الدائرة . وبما أنه لم تكن هناك أية شحنات علـى المكثـف فـى البدايـة ، فإن التيار i سيتحدد بالمقاوم R فحسب ومن ثم ، فإنه عقب إغلاق المفتـاح مباشـرة (عنـد اللحظة $t = 0$) سيكون التيار $i_0 = V_0 / R$ كما فى الشكل (ب) . على أنه بمرور الوقت ، يأخذ التيار فى النقصان كلما تراكمت الشحنة على لوحى المكثف وذلك لأن هذه الشحنة تخلق فرق جهد عبر C ، معاكسًا لجهد البطارية . ولابـد أن ينخفـض التيـار إلى الصفـر عندما تصبح شحنة المكثف فى النهاية $q_t = CV_0$.

ويوضح الشكل 1-21 (ب) الأسلوب الدقيق الذى يتصرف من خلاله التيار المـار فـى الدائرة . ويسمى المنحنى البيانى الذى يتبعه التيار **منحنى اضمحـلال أُسِّى** . والصيغـة الرياضية لـهذا السـلوك هى :

$$i(t) = i_0 e^{-t/RC} \tag{21-2}$$

حيث $i_0 = V_0 / R$. وحاصل الضرب RC لـه وحـدات زمـن **ويسمى الثـابت الزمنـى السعوى** τ_C . (تأكد من أنك تستطيع إثبات أن $\Omega.F = s$) . عنـد اللحظـة $t = \tau_C$ فإن التيار يكون قد هبط إلى $1/e = 0.37$ من قيمته الابتدائية . أما عند $t = 2\tau_C$ فالتيار يصل إلى $\left(1/e^2\right) = 0.135$ من قيمته i_0 ؛ وهكذا .

ويظل المكثف يتلقى شحنات طالما كان هناك تيار يمر فـى الدائـرة . وعندمـا يتوقـف التيار فى النهاية ، فإن معنـى ذلـك أن الجـهد عـبر المكثـف قـد أصبـح مسـاويًا لجـهد

البطارية ، أو $V_C = q_f / C = V_0$ ، حيث q_f هي الشحنة النهائية على المكثف . وتغير الشحنة على المكثف مع الزمن يمكن تمثيله بيانيًا بالشكل 1-21 (جـ) أما الصيغة الرياضية لهذا الرسم البياني فهى :

$$q(t) = q_f(1 - e^{-t/\tau_C}) = CV_0(1 - e^{-t/\tau_C}) \qquad (21\text{-}3)$$

يلاحظ أن هذا السلوك مطابق لسلوك تنامى التيار في ملف محاثة (المعادلة 6-20) . ويلعب الثابت الزمنى السعوى RC للشحنة نفس الدور الذى يلعبه الثابت الزمنى الحثى L/R بالنسبة لتيار ملف المحاثة . فكلما كان المقدار RC كبيرًا كلما استغرق الأمـر وقتًا أطول حتى « يمتلئ » المكثف بالشحنة ويمكـن إدراك هـذا المعنـى بطريقـة وصفيـة . إن القيمة الأكبر للسعة C تتطلب المزيد من الشحنـة المتراكمة لبنـاء كـل فولت واحـد من الجهد عبر لوحى المكثف كما أن قيم R الكبيرة تقوم بدور أكبر فى تحديـد قيمـة التيـار ومن ثم تحدد المعدل الذى يمكن أن توضع به الشحنات على لوحى المكثف .

عندما يوصل مقاوم R عبر مكثف مشحون مباشرة ، فإن ذلك المكثف سيفرغ شحنتـه خلال المقاوم . إذا اعتبرنا فرق الجهد الابتدائى بين لوحى المكثـف هـو V_0 فـإن التيـار الذى يسرى من المكثف عندما يأخذ فى التفريغ سوف يتغير بالطريقة المبينة فى الشكـل 1-21 (ب) . ويسلك تيار تفريغ المكثف نفس سلوك تيـار الشحـن . وتتنـاقص الشحنـة على المكثف أسيًا أيضًا بعد أن يتم التوصيل . هل يمكنك إثبات أن الجهد عـبر المكثـف لابد أن يتناقص بنفس الطريقة التى تتناقص بها الشحنة ؟ وفيما يلى المعادلات الخاصة بالمقدارين $q(t)$ و $V(t)$:

$$q(t) = q_0 e^{-t/RC} \qquad (21\text{-}4)\ (\text{أ})$$

$$V(t) = V_0 e^{-t/RC} = \frac{q_0}{C} e^{-t/RC} \qquad (21\text{-}4)\ (\text{ب})$$

ويعنى هذا أن المكثف يفرغ نحو خمسة أثمان شحنته خلال ثابت زمنى واحد .

مثال توضيحى 1-21

يشحن مكثف فى معظم أجهزة التليفزيون إلى فرق جهد يبلغ نحو 20,000 V . ويوصل مقاوم يسمى المقاوم التجزيئى عبر لوحى المكثف كإجراء وقـائى حتـى لا يحـدث تفريـغ للمكثف بعد أن يكون الجهاز قد أطفئ . افترض أن المقاومة التجزيئيـة مقدارهـا $10^6\ \Omega$ وأن $C = 10\mu F$. كم يمضى من الوقت بعد إطفاء الجهاز قبل أن يصبح لمس المكثف آمنًا ؟

استدلال منطقى : الثابت الزمنى لهذه الدائرة هو

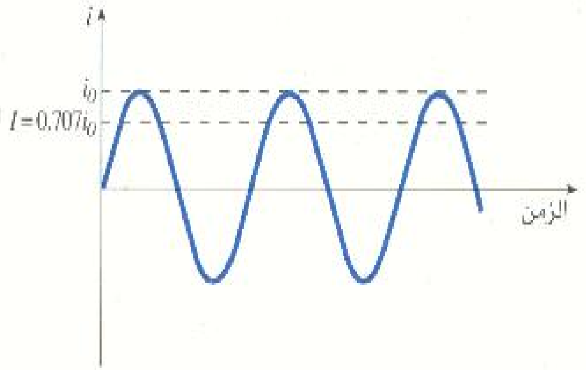
$$\tau_C = RC = (10^6\ \Omega)(10^{-5}\ \text{F}) = 10\ \text{s}$$

وكنوع من التخمين ، قد نفترض أنه سيكون آمنًا أن نلمس المكثف بعد مرور عـدد عشـرة أضعاف الثابت الزمنـى ؛ حيث توضح المعادلـة 4-21 (أ) أن $q = q_0 e^{-10}$ ؛ أى

q_0 4.5×10^{-5} . ولـهذا عند اللحظة $t = 10\ Tc$ فـإن الشحنـة والجـهد ينخفضان إلى 4.5×10^{-5} مرة قدر قيمهما الأصلية ، ولـهذا فإن V ستكون عندئذ $0.90\ V$ وهـى كميـة آمنة تمامًا .

21-2 كميات التيار المتردد ؛ قيم جذر متوسط المربعات (RMS)

تقوم شركات توزيع القدرة الكهربية ما يعرف باسم الجـهود المترددة (a.c) وتولد الشركات هذه الجهود بواسطة المولدات ذات الملف الدوار ، حيث يكون الجـهد v المتولد شبيـهًا بالجهد المتردد المبين فى الشكل 18–20 . وسوف تتذكر أنه جهد جيبى يعطى بالمعادلة $v = v_0 \sin 2\pi ft$ ، حيث f هو تردد الدوران للملف المولد (وهـو يساوى 60 Hz فـى الولايات المتحدة) . وعندما يطبق هذا النوع مـن الجـهود علـى مقاوم فإنه ينتج تيارًا كالمبين فى الشكل 2–21 ، أو تيارًا جيبيًا ومعادلته هى $i = i_0 \sin 2\pi ft$. وكما ترى فإننا قمنا بتغيير بعض الرموز التى استخدمت فى الفصول السابقة وفيما تبقى من هـذا الكتاب فإننا سنستخدم حروفًا صغيرة مثل v و i للدلالة علـى الجـهود والتيـارات التى تتغير مع الزمن . وسوف نعرف على الفور أننا قد حجزنـا الحـروف الكبيـرة أى V و I لكميات أخرى سترد عند مناقشة الجهود والتيارات المترددة .



شكل 2–21:
تكون القيمة الفعالة أو جذر متوسط مربـع التيار هى $I = i_0 / \sqrt{2} = 0.707 i_0$.

ومن المثير للاهتمام أن القيمة المتوسطة عبر دورة كاملة للجهد أو التيـار المتردد لابد أن تكون صفرًا . فكما يمكنك من دراسة الشكل 2–21 فإن الدالة الجيبية (وكذلك دالـة جيب التمام) ذات قيم سالبة بقدر مالـها من قيم موجبة تمامًا . ومـن ثم فـإن قيمتـها المتوسطة تكون صفرًا . وعلى ذلك ، وبالنسبة لجهد أو تيار مترددين (ac) فإن :

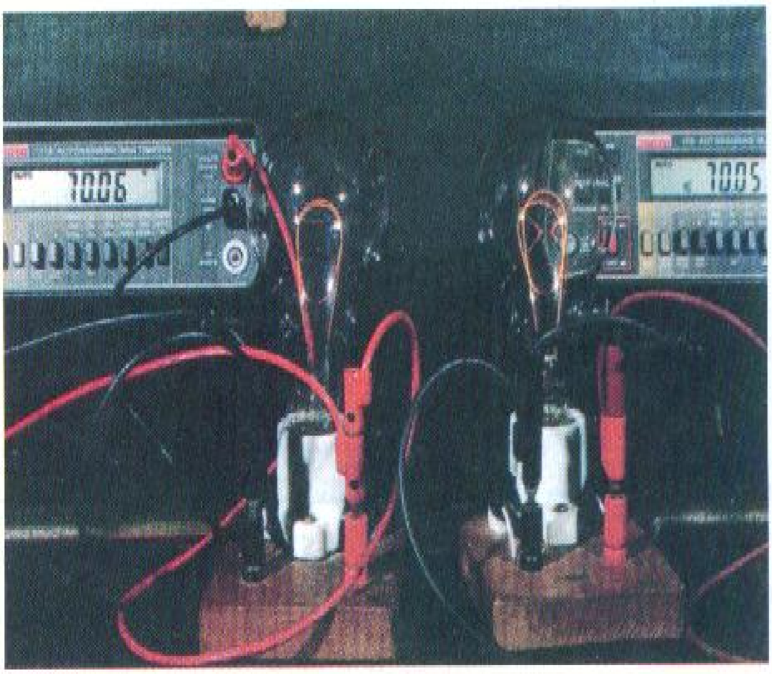
$$v_{av} = i_{av} = 0$$

ولـهذا السبب لا يمكن استعمال التيارات المترددة فى شحن البطاريات أو فى التطبيقات المماثلة . فلو أن البطارية شحنت عندما يكون التيار موجبًا فإنها ستتم بقدر مساوٍ من التفريغ عندما يكون التيار سالبًا .

وقد أثير خلاف حاد فى أواخر القـرن التاسـع عشر حـول أيـهما أكـثر جـدوى مـن الناحية العملية ، الكهرباء المنقولة بالتيـار المتردد أو المنقولـة بالتيـار المستمر . ويمكن استعمال كلا النوعين للإضاءة وتشغيل المحركات . وقد انتصر فى النهاية التيار المتردد

لأن جهده يمكن تحويله بسهولة إلى قيم أعلى أو أقل بواسطة المحـولات ، كما تعرفنا عليها فى الفصل السابق .

وتستخدم القدرة التى تصل إلى بيوتنا فى تشغيل المواقد الكهربائية أو مصابيح الإضاءة ، ومثل هذه الاستخدامات تنطوى على حرارة تتولد من التيـار المـار فـى مقـاوم . وبمـا أن القدرة المستهلكة فى هذه الحالات هى i^2R ، فإن الأمر سيان لو أن التيار كـان سـالبًا أم موجبًا لأن i^2 ستكون موجبة دائمًا . وعلى هذا فالتيـار المتردد يستوى فـى جدواه مـع التيار المستمر بالنسبة لـهذه التطبيقات .



قراءة جهاز القيـاس إلـى اليميـن هـى 70 V rms ac . (تيار متردد) ، أمـا جهاز القياس إلى اليسار فيقرأ 70 V dc (تيار مستمر) . ولكل من الجهدين نفس التأثير على بصيلات الإضاءة .

على إننا فى حاجة إلى طريقة خاصة نصف بـها التيـارات والجـهود فـى دوائـر التيـار المتردد نظرًا لأن i_{av} و v_{av} يكونان أصفارًا بالنسبة لحالة التيار المتردد .

سنفترض أن لدينا تيارًا $i = i_0 \sin 2\pi ft$ ينقل قدرة إلى المقاوم R . وهـذه القـدرة فـى أى لحظة هى

$$\text{القدرة} = i^2R = Ri_0^2 \sin^2 2\pi ft$$

وينصب اهتمامنا فى أغلب التطبيقات على متوسط القدرة :

$$\text{متوسط القدرة} = Ri_0^2 (\sin^2 2\pi ft)_{av}$$

ويمكن إثبات أن القيمة المتوسطة للمقدار $\sin^2\theta$ هو 0.50 . ولذلك*

$$\text{متوسط القدرة} = R\left(\frac{i_0}{\sqrt{2}}\right)^2$$

* تذكر أن $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$ ، ولما كان الرسم البيانى لكل من $\sin\theta$ و $\cos\theta$ لهما نفس الشكل فإن $(\sin^2\theta)_{av} = (\cos^2\theta)_{av}$. ولهذا فإن $(\sin^2\theta)_{av} + (\cos^2\theta)_{av} = 1$ أو $2(\sin^2\theta)_{av} = 1$ ومنها $(\sin^2\theta) = 0.50$.

وبمقارنة هذه المعادلة بالتعبير الخاص عن قدرة التيار المستمر $P = I^2R$ يتضح لنا أن التيار المتردد الذى ينتج قدرة متوسطة مكافئة لها هو $(i_0 / \sqrt{2})$ أو $0.707\ i_0$. ونطلق على هذا المقدار **جذر متوسط مربع التيار** (rms أو التيار الفعال) أو جذر متوسط مربع الجهد بالرمز V ونعرفه بالعلاقة $V = v_0 / \sqrt{2} = 0.707\ v_0$. ونلخص فما يلى :

قيم (rms) لكل من التيار I والجهد V هى :

$$I = \frac{i_0}{\sqrt{2}} \qquad \text{و} \qquad V = \frac{v_0}{\sqrt{2}}$$

حيث i_0 و v_0 هى سعات كل من التيار والجهد اللذين يتغيران جيبيًا مع الزمن .

ويبين الشكل 2-21 قيمة I ، ومن ثم فإن الفقد فى القدرة فى المقاوم فى دائرة تيار متردد هى :

$$P = \frac{1}{2} i_0^2 R = I^2 R$$

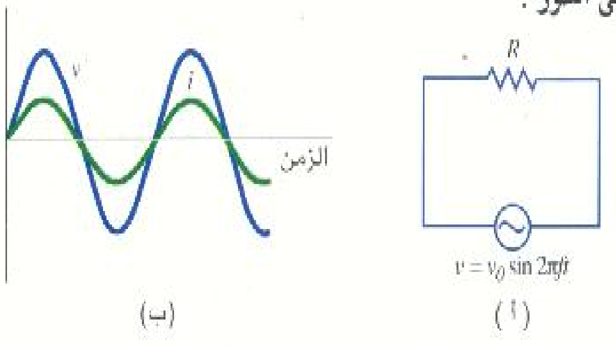
وعلينا أن نلاحظ أنه فى دائرة تيار مستمر يكون التيار اللحظى أو المتوسط أو (r.m.s) هو نفسه .

21-3 دوائر المقاومة

نستطيع الآن دراسة دوائر التيار المتردد وذلك بأخذ ثلاثة عناصر للدائرة كل فى دوره فى الاعتبار ، على أن يكون متصلاً على التوالى مع مصدر للجهد المتردد وسنبدأ بدارسة دائرة بسيطة تحتوى على مقاومة ، كالمبينة فى الشكل 3-21 (أ) . ينطبق قانون أوم عند أية لحظة على المقاوم بحيث $v = iR$ ، وحيث أن $v = v_0 \sin 2\pi ft$ فإن :

$$i = \frac{v}{R} = \frac{v_0}{R} \sin 2\pi ft$$

أى أن كلاً من الجهد والتيار يتغيران مع الزمن بنفس الطريقة ، حيث يمران بالصفر ويصلان لأقصى قيمة وأدنى قيمة معًا فى نفس اللحظة . وتكون النسبة بين v و i هى نفسها ، أو R عند كل لحظة . ونستطيع أن نرى أن التيار والجهد فى دائرة مقاومة نقية يكونان **متوافقين فى الطور** .



شكل 3-21:
يكون التيار المار فى مقاوم ما متحدًا فى الطور مع الجهد عبر المقاوم .

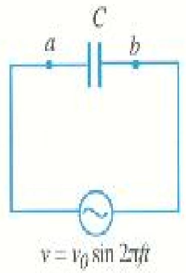
وفقد القدرة فى المقاوم هو I^2R كما أشرنا فى القسم السابق . وفى هذه الحالة الخاصة

حيث لا يوجد بالدائرة سوى مقاومة فإن $I = V/R$ ومن ثم ففقد القدرة يمكن كتابته على الصورة IV حيث I و V هي قراءات r.m.s بجهاز القياس . وسوف ندرك في الأقسام التالية أنه لا يوجد فقد في متوسط القدرة في مكثف نقي أو ملف محاثة نقي .

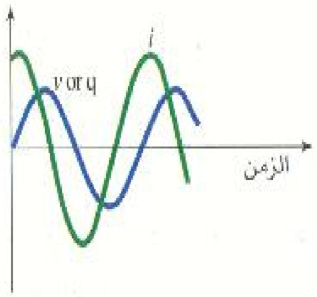
يحدث كل فقد القدرة في دوائر التيار المتردد البسيطة في المقاومات .

21-4 دوائر السعة ؛ الرد السعوى (المفاعلة السعوية)

سندرس الآن حالة دائرة السعة المبينة في الشكل 4-21 (أ) . ولقد سبق أن درسنا في القسم 1-21 كيف يقوم التيار بتوصيل شحنة إلى مكثف ليخلق فرق جهد بين طرفيه . وبعبارة أخرى فإن التيار يعتبر نذيرًا ضروريًا للجهد ويسبقه . ويغير التيار من قطبيته باستمرار في حالة إشارة جهد جيبية فيجلب شحنة موجبة إلى أحد اللوحين أولاً ثم يجلبها إلى الآخر . ويقودنا هذا إلى أن نتوقع ـ ولو وصفيًا ـ أن التيار المتردد يقود باستمرار الجهد المتردد عبر المكثف ويسبقه ببعض الوقت .



(أ)



(ب)

شكل 4-21:
يتأخر الجهد عبر المكثف عن التيار بحيث يصل إلى قيمته القصوى بعد وصول التيار لقيمته بنحو (1/4) دورة .

ويمكننا أن نكون أكثر دقة من هذا . ففي الشكل 4-21 يُعطى فرق الجهد بين النقطتين (a) و (b) بمصدر الجهد :

$$v(t) = v_0 \sin 2\pi ft$$

ويكون هو نفسه الجهد عبر C وهو الذى يتحدد بالمقدار $q(t)/C$. وحيث أن C مقدار ثابت ، فإن الشحنة على المكثف لابد وأن تتذبذب مع جهد المصدر بحيث تتوافق معه في الطور :

$$q(t) = Cv_0 \sin 2\pi ft$$

وإذا أردنا أن نعرف كيف يتغير التيار في الدائرة مع الزمن ، فعلينا تذكر أن التيار يعرف دائمًا بأنه معدل سريان الشحنة ؛ معنى هذا أن معدل تغير الشحنة على المكثف في أية لحظة $\Delta q/\Delta t$ يساوى التيار المار في الدائرة في تلك اللحظة . إلا أن $\Delta q/\Delta t$ ليست سوى ميل المنحنى الذى يبين العلاقة بين q و t كما في الشكل 4-21 (ب) . وكل ما نحتاجه هو إيجاد ميل هذا المنحنى ثم رسم النتائج لنحصل على رسم بيانى لعلاقة التيار بالزمن .

يلاحظ أنه عند $t = 0$ ، يكون لمنحنى q أكبر ميل موجب . ثم يتناقص هذا الميل حتى يصل إلى الصفر عندما تصل q إلى قمتها ، حيث يكون $i = 0$. ويتحول ميل العلاقة بين q و t فيصبح سالبًا ، ثم يصل إلى أقصى قيمة سالبة له عندما تصل q إلى الصفر . وتقع هذه النقطة عند منتصف دورة الجهد (الفولطية) . ويظل الميل سالبًا وإن كان يقل تدريجيًا حتى يصل منحنى الشحنة إلى نهايته الصغرى . وعندئذ يعود التيار فيصبح صفرًا ، وعندما يبدأ منحنى الشحنة في الزيادة مرة أخرى فإن التيار يصبح موجبًا . وإذا ما اعتبرنا كل التفاصيل فإننا نستطيع أن نرسم المنحنى الدقيق للعلاقة بين التيار والزمن t ، وهو ما نراه في الشكل 4-21 (ب) .

ومن الواضح الآن أن كلاً من q و i يمران بتغيرات جيبية لها نفس التردد . ولكن التيار والشحنة ليسا متوافقين فى الطور كما وصفنا آنفًا .

وفى الواقع فإن i يصل إلى قيمه القصوى والصغرى متقدمًا بربع (1/4) دورة عن القيم المناظرة لكل من q (و v) . ويقودنا هذا إلى النتيجة المهمة التالية :

فى الدائرة المحتوية على مكثف فقط فإن التيار المتردد يقود الجهد المتردد بربع دورة .

والمنحنى المبين فى الشكل 4-21 (ب) هو منحنى دالة جيب تمام (cos.) ولهذا فإن التعبير الرياضى عن $v(t)$ و $i(t)$ هو :

$$v(t) = v_0 \sin 2\pi ft \qquad \text{و} \qquad i(t) = i_0 \cos 2\pi ft$$

سنقوم الآن ببحث موضوع تبدد القدرة فى هذا النوع من الدوائر . تعطى القدرة اللحظية الواصلة إلى المكثف بالعلاقة المعتادة الآتية :

$$\text{القدرة} = vi = v_0\, i_0 \sin 2\pi ft \cos 2\pi ft$$

ويمكن التعبير عن هذا بصورة أفضل إذا تذكرنا أن :

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

وبقسمة هذه المعادلة على 2 والتعويض بالمقدار $2\pi ft$ بدلاً من θ فإن :

$$\text{القدرة} = \frac{1}{2} v_0\, i_0 \sin 4\pi ft$$

ويعنى هذا أن القدرة اللحظية الواصلة إلى المكثف تتغير جيبيًا وترددها ضعف تردد الجهد المتردد . ومن ثم يكون متوسط القدرة الواصلة على المكثف صفرًا وذلك لأن الدالة الجيبية تكون سالبة بقدر ما تكون موجبة . وخلال نصف الدورة يتم شحن المكثف وتختزن بداخله الطاقة ، أما خلال نصف الدورة التالى فإن المكثف يفرغ شحنته ويعيد ما اختزنه من طاقة إلى مصدر القدرة وتكون النتيجة النهائية هى ما يلى :

فى دائرة تيار متردد ، يكون متوسط القدرة المستهلكة فى مكثف مثالى صفرًا .

ولكى يكتمل تحليلنا للكيفية التى يؤثر بها مكثف على التيار فى دائرة تيار متردد فإننا بحاجة إلى إيجاد علاقة بين i و v تماثل قانون أوم بالنسبة للمقاومات والسبيل إلى هذا هو معرفة تفاعل المكثف مع تردد الجهد المطبق عليه . فإذا كان التردد منخفضًا جدًا ، كأن يكون دورة واحدة فى الساعة ، فإن المكثف سيصبح مشحونًا تمامًا فى كسر صغير من دورة ، أما فى معظم ما تبقى من الدور فإن المكثف سيمنع أى شحنة من المرور من خلاله . أما عند الترددات المرتفعة فإن الجهد سيتردد بسرعة بحيث يقضى المكثف معظم الوقت بين حالتى الشحن والتفريغ مما يعنى أن التيار سيمر بشكل مستمر تقريبًا جيئة وذهابًا خلال الدائرة . ونستطيع من ثم القول :

إن قابلية المكثف على إعاقة التيار كبيرة جدًا عند الترددات المنخفضة وصغيرة عند الترددات المرتفعة .

ويمكننا أيضا أن ندرك أن قيمة C تلعب دورًا فى تحديد قيمة التيار . إذ أن C الكبيرة تتطلب شحنة أكبر حتى تكوّن جهدًا مقداره v_0 أو أن مزيدًا من الشحنة لابد أن يسرى نحو السعة الكبيرة . كما أن تيارًا صغيرًا نسبيًا سيكون لازما لشحن مكثف ذى سعة صغيرة تمامًا . ولذا يمكن القول .

إن مقدرة مكثف ما على إعاقة التيار كبيرة إذا كانت C صغيرة و صغيرة إذا كانت C كبيرة .

ويشار إلى مقدرة المكثف على إعاقة سريان الشحنة بمصطلح **الرد السعوى (أو المفاعلة السعوية)** ويرمز له بالرمز X_C . وترتبط هذه الكمية بقيم (rms) للتيار والجهد فى الدائرة المبينة فى الشكل 4-21 بعلاقة تماثل قانون أوم :

$$V = IX_C \qquad (21\text{-}5)$$

حيث تحل X_C محل R فى قانون أوم . ويمكن عند استعمال حساب التفاضل والتكامل إثبات أن :

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \qquad (21\text{-}6)$$

ولابد أنه من الواضح من المعادلة (5-21) أن وحدات X_C هى الأوم . إلا أنه يتوجب عليك أن تصل إلى هذه النتيجة من تعريف وحدة الـهيرتز (Hz) والفاراد (F.) ويلاحظ أن الأثر المعاوق للمكثف معبرًا عنه بالكمية X_C ، يعتمد على f و C على الصورة التى شرحناها وصفيًا فيما سبق .

ومن الأهمية بمكان إدراك الفرق التالى بين المعادلة (5-21) وقانون أوم :

يُعرّف الرد السعوى X_C بدلالة قيم (rms) فقط لكل من التيار والجهد ، ولا ينطبق على القيم اللحظية لهما .

والسبب فى هذا هو أنه عند أية لحظة يكون v و i فى نقط مختلفة من دوراتهما المختلفة .

مثال 1-21 :

اعتبر أن لديك فولتميتر متصل عبر مصدر الجهد المبين فى الشكل 4-21 وإنه يشير إلى 80 V وكان $C = 0.40\ \mu F$. أوجد قيمة (rms) للتيار إذا كان تردد الجهد هو (أ) 20 Hz و (ب) 2×10^6 Hz .

استدلال منطقى :

ا

سؤال : كيف ترتبط قيمة (rms) للتيار مع قيمة (rms) للجهد بالنسبة للدائرة المبينة فى الشكل 4-21 ؟

الإجابة : إن النسبة V/I هى الرد السعوى X_C :

$$\frac{V}{I} = X_C$$

سؤال : ما الذى يعين X_C ؟

الإجابة : إنه تردد الجهد وقيمة السعة C :

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

الحل والمناقشة : سنحسب أولاً X_C بدلالة f :

$$X_C = \frac{1}{2\pi f(4.0\times 10^{-7}\,\text{F})} = \frac{4.0\times 10^{5}}{f}\ \Omega/\text{s}$$

إذن ،

بالنسبة للتردد $f = 20$ Hz : $X_C = 2.0\times 10^{4}\ \Omega$

وبالنسبة للتردد $f = 2\times 10^{6}$ Hz : $X_C = 0.20\ \Omega$

وعلى هذا تكون قيم rms للتيارين كما يلى :

بالنسبة للتردد $f = 20$ Hz

$$I = \frac{V}{X_C} = \frac{80\ \text{V}}{2.0\times 10^{4}\ \Omega} = 4.0\ \text{mA}$$

بالنسبة للتردد $f = 2$ MHz

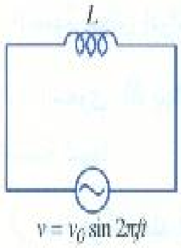
$$I = \frac{80\ \text{V}}{0.2\ \Omega} = 400\ \text{mA}$$

ويلاحظ الأثر الضخم للتردد فى تحديد قيمة rms للتيار .

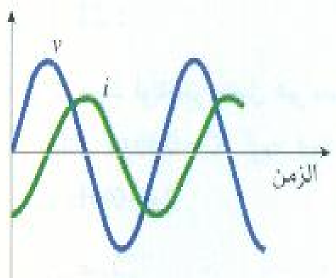
تمرين : ما هى سعات التيار والجهد فى هذا المثال ؟

الإجابة : $v_0 = 113$ V ، $i_0 = 5.7$ mA ، $i_0 = 570$ A

21-5 دوائر المحاثة ؛ الرد الحثى (أو المفاعلة الحثية)



(أ)



(ب)

شكل 5-21:
يقود الجهد عبر ملف المحاثة التيار المار خلاله بتسعين درجة (°90) أو (1/4) دورة . وعليك ملاحظة الرمز المستخدم للدلالة على ملف المحاثة .

يمكننا تحليل سلوك دائرة المحاثة الذاتية البسيطة المبينة فى الشكل 5-21 (أ) بطريقة تماثل المستخدمة فى دائرة السعة . وسنبدأ باعتبار أن التيار المار فيها يتغير كدالة جيبية فى الزمن :

$$i(t) = i_0 \sin 2\pi ft$$

والرسم البيانى لهذا السلوك موضح فى الشكل 5-21 (ب) . ونريد الآن أن نعرف كيفية تغير الجهد عبر ملف المحاثة $v(t)$ مع $i(t)$. ونعرف من المعادلة (5-20) أن الجهد عبر ملف محاثة هو $L(\Delta i/\Delta t)$. ومن ثم ترتبط القيم اللحظية لكل من v و i بالعلاقة :

$$v(t) = L\frac{\Delta i}{\Delta t}$$

وعلى هذا نستطيع أن نعين $v(t)$ إذا رسمنا العلاقة البيانية بين ميل المنحنى $i(t)$ باستخدام

نفس الملاحظات التى أشرنا إليها فى القسم السابق والنتيجة مبينة فى الشكل 5-21 (ب) . ويتضح أنه فى هذه الحالة يقود الجهد التيار بربع (1/4) دورة .

فى الدائرة المحتوية على ملف محاثة فقط فإن الجهد المتردد يقود التيار المتردد بربع (1/4) دورة .

وتتفق هذه النتيجة مع ملاحظاتنا الوصفية التى أشرنا إليها فى بداية هذا الفصل وهى أن التيار « يطارد » دائمًا الجهد المطبق على ملف المحاثة .

ونستطيع استخدام نفس الاستدلال المنطقى المتبع فى القسم 4-21 لكى نثبت أن ملف المحاثة لا يستهلك - فى المتوسط - أية طاقة . فعلى الرغم من أن المصدر يختزن الطاقة فى ملف المحاثة خلال جزء من الدورة ، فإن ملف المحاثة يقوم بإعادتها إلى المصدر فى جزء يليه من الدورة . وقد بينًا فى الفصل العشرين أن الطاقة المختزنة فى ملف المحاثة هى $(\frac{1}{2}Li^2)$. وتحسن صنعًا إذا فحصت الشكل 5-21 (ب) وحددت جزء الدورة الذى يفقد المصدر أثناءه طاقة والجزء الذى تتم فيه إعادة تلك الطاقة إلى المصدر .



تصنع ملفات المحاثة فى أحجام عديدة لكى تؤدى وظائف متنوعة فيما يتعلق بالعمل والصناعة .

فى دائرة تيار متردد ، فإن متوسط القدرة المستهلكة بواسطة ملف محاثة نقى يكون صفرًا .

ونبحث - كما سبق - عن علاقة بين الجهد والتيار فى دائرة محاثة . إن ق.د.ك المستحثة والتى تعوق نمو التيار هى $L(\Delta i/\Delta t)$ ، وكلما زادت قيمة L كلما زاد هذا التأثير ولذا يمكننا القول بأن :

مقدرة ملف محاثة ما على إعاقة التيار فى دائرة تيار متردد ، تتناسب مع المحاثة .

ويتناسب المعامل $\Delta i/\Delta t$ ببساطة مع التردد الذى يتغير به اتجاه التيار . ونستنتج من ثم أن :

مقدرة ملف محاثة ما على إعاقة التيار فى دائرة تيار متردد يتناسب مع التردد .

ونمثل الأثر المعوق لملف المحاثة عادة **بالرد الحثى (أو بالمفاعلة الحثية)** X_L حيث يعرف X_L بثابت التناسب بين قيمة rms للفولطية (الجهد) وقيمة rms للتيار فى الدائرة :

$$V = I X_L \tag{21-7}$$

ويمكن إثبات أن :

$$X_L = 2\pi f L \tag{21-8}$$

وهى نتيجة تتفق مع مناقشتنا الوصفية السابقة ، كما أن المعادلة (7-21) هى المكافئ لقانون أوم فى حالة ملفات المحاثة . ولابد أن تكون وحدات X_C هى الأوم ، وهى حقيقة عليك إثباتها من تعريفى الهيرتز (Hz) والهنرى (H) .

وكما حدث فى حالة الرد السعوى فإن X_L تربط بين قيم rms لكل من I و V . كما أنها لا تنطبق على القيم اللحظية .

ونور في جدول (1-21) ملخصًا لأنواع التأثيرات لعناصر دوائر التيار المتردد .

الجدول 1-21 : تأثيرات كل من L ، R ، C في دوائر التيار المتردد .

	المقاوم	المكثف	ملف المحاثة
علاقات الطور بين v و i	متفقة في الطور	i يقود v بربع دورة	v يقود i بربع دورة
العلاقة بين V و I	$V = IR$ R لا تعتمد على f	$V = IX_C$ $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$	$V = IX_L$ $X_L = 2\pi fL$
متوسط فقد القدرة	$P = I^2R$	$P = 0$	$P = 0$

مثال 2-21 :

افترض أن ملف المحاثة المبين في الشكل 5-21 (أ) قيمته 15 mH . وكان جهد المصدر كما يبينه جهاز قياس التيار المتردد هو 40 V وتردده 60 Hz . أوجد التيار المار في ملف المحاثة . وكرر الحسابات عندما يكون التردد 6.0×10^5 Hz .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هي الكمية التي تربط بين قيمة (rms) للتيار وقيمة (rms) للجهد في ملف محاثة ؟

الإجابة : إنها الرد الحثي X_L : $V = I X_L$ ، حيث $X_L = 2\pi fL$

الحل والمناقشة : بالنسبة للمصدر الذي تردده 60 Hz فإن الرد هو

$$X_L = 2\pi(60\ \text{Hz})(15 \times 10^{-3}\ \text{H}) = 5.6\ \Omega$$

وبالنسبة للتردد 0.60 MHz :

$$X_L = 2\pi(0.60 \times 10^6\ \text{Hz})(15 \times 10^{-3}\ \text{H}) = 5.7 \times 10^4\ \Omega$$

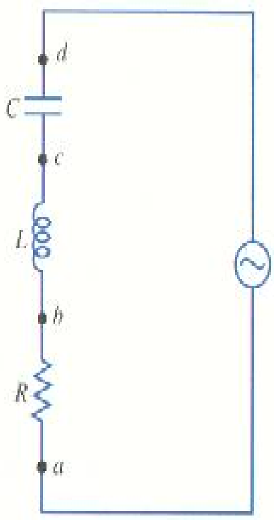
وقيمة rms للتيار المناظرة

$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{40\ \text{V}}{5.6\ \Omega} = 7.1\ \text{A}$$

و

$$I = \frac{40\ \text{V}}{5.7 \times 10^4\ \Omega} = 7.1 \times 10^{-4}\ \text{A}$$

لاحظ كيف يعوق ملف المحاثة التيار بشكل كبير عند الترددات المرتفعة .



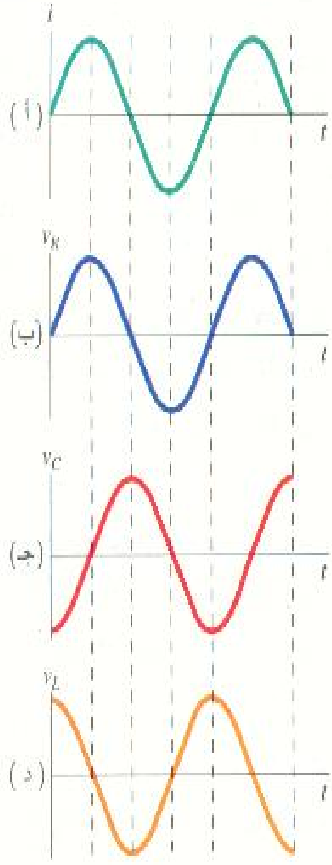
شكل 6-21:
دائرة LRC على التوالي .

6-21 دوائر LRC مجتمعة ؛ علاقة الطور بين التيار والجهد

سندرس الآن حالة دائرة تتصل فيها العناصر الثلاثة معًا على التوالي ، وهي الدائرة التي

تعرف بدائرة LRC على التوالي ويبين إحداها الشكل 6-21 ونود الآن تحديد العلاقة - كما سبق - بين قيم rms للتيار وقيم rms للجهد . كما نود أن نحدد علاقة الطور بين القيم اللحظية v و i وفقد القدرة في الدائرة .

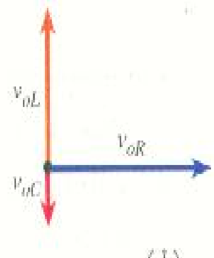
وفي البداية ، نؤكد أن كل عنصر في الدائرة لابد أن يمر به نفس التيار اللحظي . وسنعتبر هذا التيار على صورة ، $i(t) = i_0 \sin 2\pi ft$. والشكل 7-21 (أ) يمثل هذا التيار بيانيًا . ونستطيع على الفور أن نرسم بيانيًا الجهد عبر كل من عناصر الدائرة بناء على مناقشتنا السابقة . والجهد عبر R وهو v_R يتفق في الطور مع i (الشكل 7-21 (ب)) ؛ أما الجهد عبر C وهو v_C **فيتأخر** عن التيار بربع دورة (الشكل 7-21 (جـ)) ، أما الجهد عبر L ، v_L فيقود التيار ، أي يسبقه بربع دورة (الشكل 7-21 (د)) .



شكل 7-21:
v_R فقط هو المتفق في الطور مع i . أما V_L و V_C فتختلف في الطور بمقدار (1/4) دورة (°90) مع i .

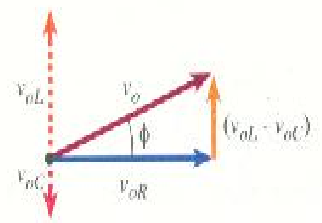
يلاحظ من هذه الرسومات البيانية أن V_L و V_C لهما دائمًا إشارة معاكسة ، ولهذا فهما يطرحان من بعضهما . افترض أن فولتميتر تيار متردد يسجل V_L عبر ملف المحاثة و V_C عبر المكثف . فإذا كان $V_L = V_C$. فإن سعتي v_C و v_L ستكونان متساويتين تمامًا ، ويلغي v_C تمامًا v_L وفي هذه الحالة فإن الفولتميتر المتصل بين النقطتين b و d في الشكل 6-21 سوف يسجل صفرًا وليس $V_C + V_L$! وهكذا نرى أن قراءات فولتميتر التيار المتردد لا تجمع لكي تعطي فروق الجهد الصحيحة . وعلى الرغم من أن الجهود اللحظية تجمع مباشرة ، إلا أن قيم rms للجهود والتي تسجلها أجهزة قياس التيار المتردد تكون دائمًا موجبة ولا تظهر آثار الإلغاء التي قد تكون موجودة .

ويمكن جمع المقادير المتذبذبة التي تكون مختلفة في الطور مع بعضها البعض بواسطة رسم هندسي بياني بسيط . ومفتاح فهم هذا الرسم هو في معرفة أن 1/4 دورة تكافئ اختلافًا مقداره °90 في طور كمية تتغير جيبيًا مع الزمن . وسنمثل سعة الجهد عبر R وهي v_{0R} بمتجه يتجه نحو اليمين في الشكل 8-21 (أ) . **ونعلم أن هذا الجهد متفق في الطور مع التيار المار في الدائرة ولذلك فإن هذا الاتجاه هو الذي يمثل التيار أيضًا** . ولكي نمثل سعة الجهد v_{0L} عبر L فلابد من رسم متجه يتجه بزاوية °90 بعيدًا عن v_{0R} كما الشكل 8-21 (أ) . وهذه الزاوية هي التي تناظر اختلافًا في الطور مقداره ربع دورة بين v_{0L} و i_0 . أما سعة الجهد v_{0C} عبر المكثف فلابد من رسمها في اتجاه **ضد** اتجاه v_{0L} . وتتحدد **مقادير** هذه المتجهات من قانون أوم والقوانين المكافئة له .



$$v_{0R} = i_0 R \qquad , \qquad v_{0L} = i_0 X_L \qquad , \qquad v_{0C} = i_0 X_C$$

ويمكننا الحصول على السعة الخاصة بالجهد الكلي v_0 المطبق على الدائرة باللجوء إلى جمع المتجهات المعتاد . فنبدأ أولاً بطرح v_{0L} و v_{0C} المتعارضين كما في الشكل 8-21 (ب) . ثم نضيف هذا المتجه الناتج إلى v_{0R} باستخدام نظرية فيثاغورس .



شكل 8-21:
تجمع قيم rms للجهود في دائرة RLC جمعًا متجهيًا (جمع متجهات) .

$$v_0^2 = v_{0R}^2 + (v_{0L} - v_{0C})^2 = i_0^2 [R^2 + (X_L - X_C)^2]$$

وبأخذ الجذر التربيعي لهذا المقدار فإننا نحصل على القانون المكافئ لقانون أوم بالنسبة لدائرة LRC :

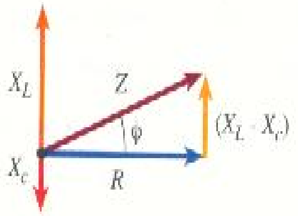
$$v_0 = i_0 Z \qquad (21-9)$$

حيث يطلق على Z اسم **معاوقة** الدائرة وتعطى بالمعادلة

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad (21-10)$$

ووحدات Z هى الأوم كما يمكنك استنتاج ذلك بسهولة . ويوضح الشكل 9-21 العلاقة التربيعية بين R ، $(X_L - X_C)$ و Z بما يتفق مع المعادلة (10-21) .

ومن الطبيعى أن تنطبق المعادلة 9-21 أيضًا على قيم rms لكل من I و V لأنهما ببساطة حاصل ضرب العامل الثابت 0.707 فى السعات المناظرة . ويلاحظ أن الأمر سيان ، سواء طرحنا X_L من X_C أو العكس ، لأننا فى كلتا الحالتين سوف نربع الفرق عند حساب Z .



شكل 9-21:
تمثل المعاوقة بوتر المثلث قائم الزاوية الذى ضلعاه هما R و $|X_L - X_C|$. والزاوية ϕ هى زاوية الطور بين i_0 (فى اتجاه محور R) و v_0 (فى اتجاه المحور Z) .

والزاوية ϕ فى الشكل 9-21 هى الفرق فى الطور بين i و v فى الدائرة . ولكى ندرك هذا ، فإن عليك ملاحظة أنها الزاوية المحصورة بين الجهد الكلى والجهد عبر R الذى يتفق فى الطور مع i . ونستطيع بسهولة أن نحصل على ϕ من :

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} \qquad (21-11)$$

إذا كان $X_L > X_C$ فإن الجهد **يتقدم** على التيار (**يقوده**) بزاوية طور مقدارها ϕ . أما إذا كان $X_L < X_C$ فإن الجهد **يتخلف** (يتأخر) عن التيار بالزاوية ϕ .

وعلى الرغم من معرفتنا أن فقد القدرة فى الدائرة يحدث كلية فى R ويساوى I^2R إلا أن هناك طريقة مفيدة لحساب الفقد فى القدرة :

$$\text{الفقد فى القدرة} = I^2R = \frac{V}{Z} IR = VI\left(\frac{R}{Z}\right) = VI\cos\phi \qquad (21-21)$$

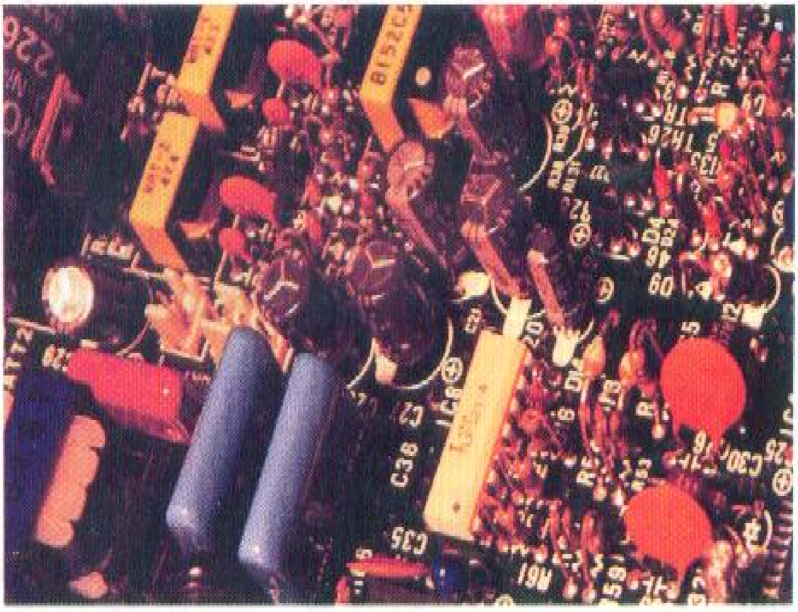
حيث استخدمت المعادلة (11-21) و V و I هى قيم rms لها كالمعتاد . ويسمى المعامل $\cos\phi$ **بمعامل القدرة** للدائرة .

ولدينا حالتان مثيرتان للاهتمام . إذا كانت الدائرة تحتوى على R و C فقط (أى أنها دائرة RC) ، فيمكننا عندئذ وضع $L = 0$ و $X_L = 0$. ومن ثم تؤول معاوقة الدائرة إلى :

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \qquad (\text{دائرة } RC)$$

أما إذا لم تحتو الدائرة على مكثف ، فما هى قيمة X_C التى علينا استعمالها ؟ إذ ليس صحيحًا أن نقول أن $C = 0$ فى هذه الحالة لأن هذا يعنى أن X_C ستكون لانهائية . إن عدم وجود مكثف مكافئ للحالة $C = \infty$ ، حيث أن مثل هذا المكثف لن « يشبع » من الشحنات ولن يكون عائقًا أمام التيار بالتالى . وهكذا فإن $X_C = 0$ سيكون هو الاختيار الصحيح فى حالة دائرة RL . وسوف تكون المعاوقة هى

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \qquad (\text{دائرة } RL)$$



تحتوى لوحة دائرة إلكترونية على العديد من المقاومات والمكثفات وملفات المحاثة .

مثال 3-21 :

يتصل مصدر قدره ($V = 80.0$ V, $f = 2000$ Hz) على التوالى مع مقاوم 300 Ω ومكثف سعته 0.600 μF . أوجد (أ) التيار المار فى الدائرة ، (ب) قراءة الفولتميتر المتصل عبر المقاوم ، (جـ) قراءة الفولتميتر عبر المكثف و (د) الفقد فى القدرة فى الدائرة .

استدلال منطقى الجزء (أ) :

سؤال : ما هى العلاقة بين V و I فى دائرة RC المتصلة على التوالى ؟

الإجابة : $V = IZ$ ، حيث $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$.

سؤال : ما هى معادلة Xc ؟

الإجابة : من المعادلة (21-6) : $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ ، حيث $f = 2000$ Hz

و $C = 0.60 \times 10^{-6}$ F .

الحل والمناقشة : سنوجد Xc و Z و I :

$$X_C = \frac{1}{2\pi(2000\ \text{Hz})(0.600\times10^{-6}\ \text{F})} = 133\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{(300\ \Omega)^2 + (133\ \Omega)^2} = 328\Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{80.0}{328\ \Omega} = 0.244\ \text{A}$$

استدلال منطقى الجزء (ب) :

سؤال : ما هو الجهد الذى سيسجله الفولتميتر ؟

الإجابة : إنه قيمة rms للجهد .

سؤال : ما الذى يحدد جهد (rms) عبر R و C ؟

الإجابة : $V_R = IR$ و $V_C = IX_C$

الحل والمناقشة : باستخدام قيم I و X_C التى أوجدناها من قبل ، فإن

$$V_R = (0.244\ \text{A})\ (300\ \Omega) = 73.2\ \text{V}$$

$$V_C = (0.244\ \text{A})\ (133\ \Omega) = 32.6\ \text{V}$$

ويلاحظ أن $V_R + V_C$ لا يساوى جهد المصدر وهو 80.0 V وذلك لأن الجهدين مختلفان فى الطور . إن قيمتيهما اللحظيتين ستظلان دائماً مساويتين 80.0 V ولكن ليس هذا هو ما يسجله الفولتميتر .

استدلال منطقى الجزء (جـ) :

سؤال : على أى شىء يعتمد متوسط الفقد فى القدرة ؟

الإجابة : على قيمة (rms) للتيار وعلى المقاومة : $P = I^2R$.

الحل والمناقشة : متوسط الفقد فى القدرة هو

$$P = (0.244\ \text{A})^2\ (300\ \Omega) = 17.9\ \text{W}$$

وهناك طريقة بديلة بحساب معامل القدرة أولاً :

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{300\ \Omega}{328\ \Omega} = 0.915$$

والتعبير البديل للفقد فى القدرة هو

$$P = IV\cos\phi = (0.244\ \text{A})(80.0\ \text{V})(0.915) = 17.9\ \text{W}$$

مثال 4-21 :

افترض أن مصدر الجهد فى الشكل 6-21 يوفر (rms) للجهد مقداره 50.0 V بتردد مقداره 600 Hz . ثم افترض أن $R = 20.0\ \Omega$ ، $C = 10.0\ \mu F$ و $L = 4.00$ mH . أوجد (أ) التيار المار فى الدائرة و (ب) قراءة الفولتميتر عبر R ، C ، L كل على حدة .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى معادلة التيار ؟

الإجابة : $I = \dfrac{V}{Z}$

سؤال : ما هى قيمة Z فى هذه الدائرة ؟

الإجابة : بالنسبة لدائرة LRC فإن :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

حيث $X_C = \dfrac{1}{2\pi fC}$ و $X_L = 2\pi fL$

سؤال : ما هى معادلات قيم (rms) للجهود المنفردة ؟

الإجابة : $V_R = IR$ ، $V_C = IX_C$ ، $V_L = IX_L$

الحل والمناقشة : قيم الردود هى :

$$X_C = \frac{1}{2\pi(600\ \text{Hz})(10^{-5}\ \text{F})} = 26.5\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi(600\ \text{Hz})(4.0\times10^{-3}\ \text{H}) = 15.1\ \Omega$$

والفرق بين هذين المقدارين هو : $X_C - X_L = 11.4\ \Omega$

ومن ثم تكون المعاوقة هى :

$$Z = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (11.4\ \Omega)^2} = 23\ \Omega$$

ومنها نستنتج قيمة التيار :

$$I = \frac{50\ \text{V}}{23.0\ \Omega} = 2.17\ \text{A}$$

وفروق الجهد المنفردة (عبر كل عنصر على حدة) هى :

$$V_R = (2.17\ \text{A})(20\ \Omega) = 43.4\ \text{V}$$

$$V_C = (2.17\ \text{A})(26.5\ \Omega) = 57.5\ \text{V}$$

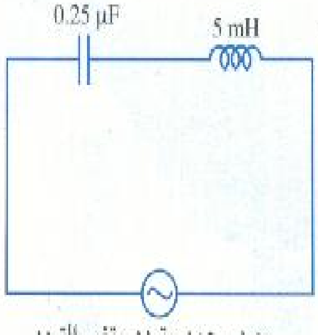
$$V_L = (2.17\ \text{A})(15.1\ \Omega) = 32.8\ \text{V}$$

يلاحظ أن فرق الجهد عبر المكثف أكبر من الذى يوفره المصدر . ومرة أخرى نؤكد أن قيم rms لفروق الجهد لا تجمع مثلما يحدث بالنسبة للقيم اللحظية . على إنها تجمع متجهيًا عندما يؤخذ الفرق فى الطور بينها فى الاعتبار .

تمرين : ما هو فرق الطور بين i و v ؟ أيهما يتقدم الآخر ؟

الإجابة : $\phi = 29.6°$ ، وبما أن $X_C > X_L$ فإن i تسبق (تقود) v بمقدار هذه الزاوية .

21-7 الرنين الكهربائى فى دوائر *LRC* المتصلة على التوالى



مصدر جهد متردد متغير التردد

شكل 10-21: عند تغير تردد الجهد فإن كلاً من X_L و X_C تتغير كما بالشكل 11-21 أما التيار فيتغير كما فى الشكل 12-21 .

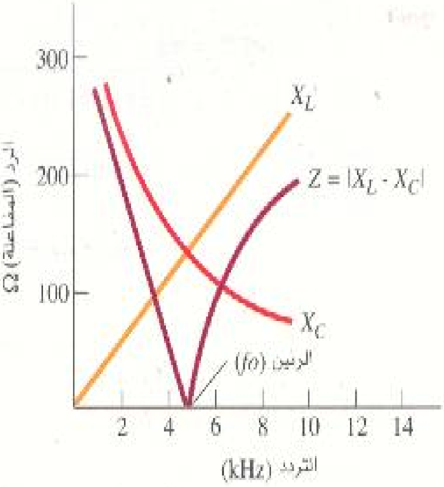
سننظر الآن فى حالة دائرة لا تحتوى إلا على مكثف C ومحاثة L ، كالمبينة فى الشكل 10-21 . على أن هذا ليس موقفًا واقعيًا ، لأن أى ملف محاثة لابد وأن يتضمن ـ بشكل عام ـ بعض المقاومة . وعلى الرغم من هذا فمثل هذه الدائرة المثالية يمكن أن نتعلم منها الكثير . إذا وضعت $R = 0$ فإن المعادلة 10-21 الخاصة بالمعاوقة تؤول على :

$$Z = |X_L - X_C|$$

وقد استعملنا هنا الخطين الرأسيين الدالين على القيمة المطلقة ، لأن المعاوقة السالبة ليس لها مدلول فيزيائى . والتيار المار فى هذه الدائرة هو :

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{|X_L - X_C|}$$

يلاحظ أنه عندما تكون $X_L = X_C$ فإن التيار يصبح لا نهائيًا .



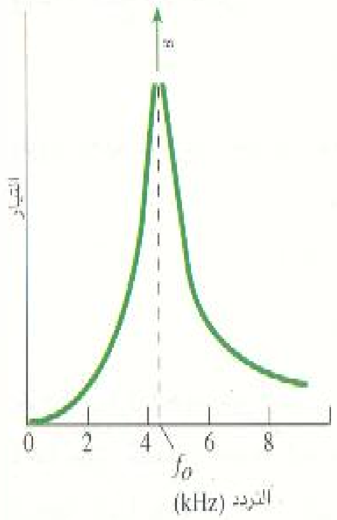
شكل 11-21:
تتغير كل من X_C ، X_L وكـذا Z للدائـرة المبينة فى الشكل 10-21 مع تردد المصدر .

ومن السهل ـ فى الواقع ـ الحصول على الشرط $X_L - X_C = 0$ لأن X_L تزيـد بتزايد التردد بينما X_C تتناقص مـع زيـادة التـردد . ويبين الشكـل 11-21 كيفيـة تغير هـذه المقادير بالنسبة لكل من C و L الواردتين فـى الشكـل 10-21 . وعندمـا يصبح التـردد $f = 4500$ Hz فإن المعاوقة تصير صفرًا فى هذه الحالة . ويطلق على التردد الـذى تصـير عنده $X_L = X_C$ اسم **تردد الرنين** للدائرة ، وسنرمز له بالرمز f_0 . وبما أن $X_L = 2\pi fL$ و $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ فإن الرنين يحدث عندما

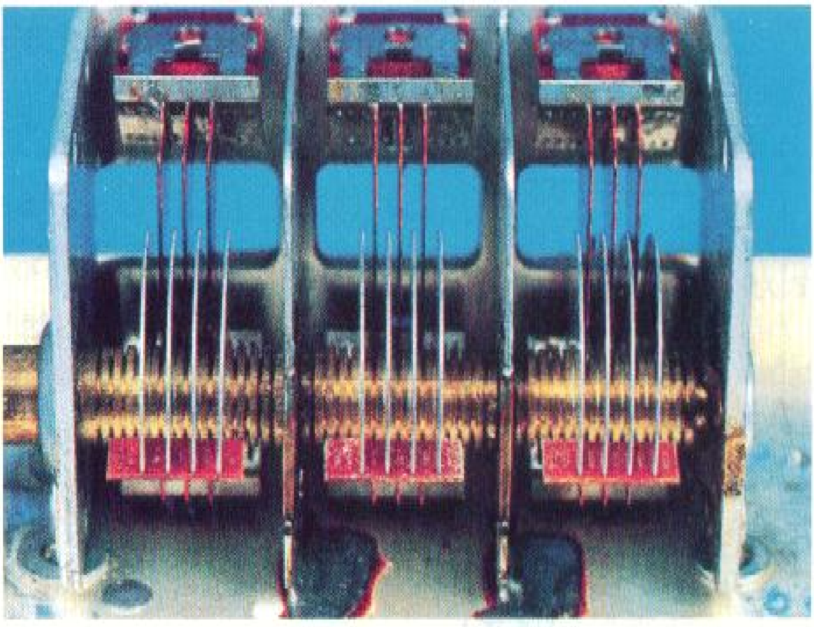
$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

ومنها نستنتج قيمة تردد الرنين :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad (21\text{-}13)$$



شكل 12-21:
عندما يتغير تردد المصدر المبين فى الشكل 10-21 ، فإن التيار المار فـى الدائـرة يسلك كما هو مبين بالشكل .



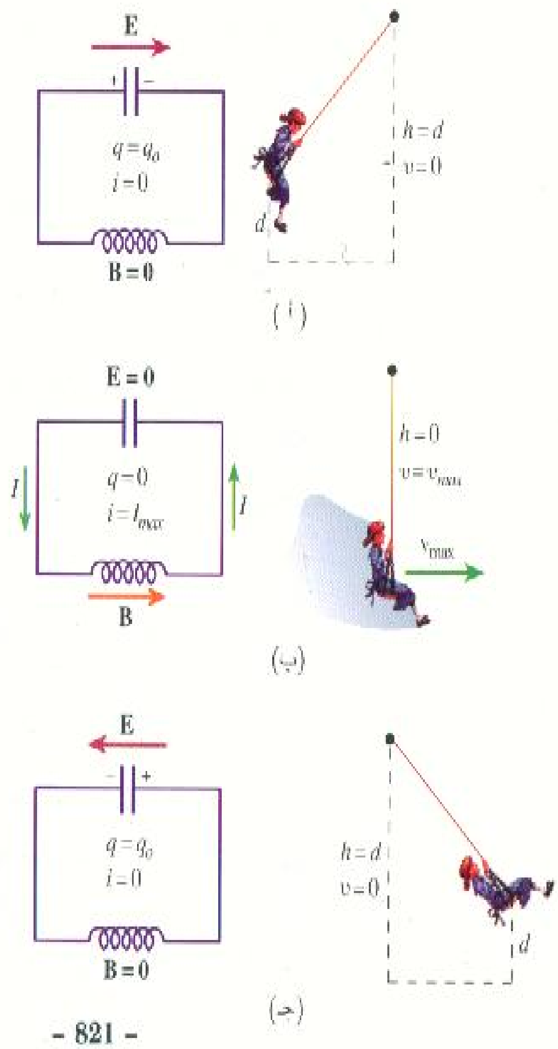
توضح الصورة مكثفًا متغيرًا مـن النـوع المستخدم فى دائرة الهوائى لجهاز راديـو . ويثبت مفتاح التناغم (الضبط) عند نهايـة عمود من النحاس الأصفـر . وعنـد إدارة هذا المفتـاح فـإن الألـواح المعدنيـة ذات الحواف الفضية تتحرك إلى داخل أو خـارج الحيز بين الألـواح الثابتـة ذات اللـون الأحمر ؛ مما ينتج عنـه تغـير المسـاحة الفعالة للمكثف ومن ثم تغير سعته . ممـا يغير بدوره من تردد الرنين لدائـرة LRC للهوائى مما يسمح للراديو أن يلتقط المحطات ذات الترددات المختلفة .

ويوضح الشكل 12-21 كيف يتغير التيار فى الدائرة المبينة فى الشكل 10-21 مع تغير تردد الجهد المتردد . (من الطبيعى أنه لابد لسعة الجهد أن تحفظ ثابتة عند كل الترددات) . وكما نلاحظ فإن التيار يصل إلى قمة حادة عند تردد الرنين . على أنه فى الدوائر العملية تكون القمة محددة وليست لانهائية وذلك لأن جميع الأسلاك لابد وأن تحتوى على بعض المقاومة .

دعنا الآن نطبق هذه النتيجة على دائرة LRC ، تعطى معاوقتها بالمعادلة 10-21 عند الرنين يلغى X_C و X_L أحدهما الآخر بحيث تظل $Z = R$. ويعنى هذا أيضًا أن $\cos \phi = 1$ وأن يكون الفقد فى القدرة = IV . وعليه نرى أن :

عند تردد الرنين تسلك دائرة LRC كما لو كانت دائرة بها مقاومة نقية فحسب .

ونستطيع فهم الرنين الكهربائى بشكل أفضل إذا أدركنا أنه يشبه إلى حد بعيد الرنين الميكانيكى . وتعلم بالفعل أن النظم الميكانيكية لها دائمًا تردد طبيعى تهتز عنده . وإذا دفع النظام بهذا التردد فإنه يهتز بأقصى سعة ممكنة ؛ وبعبارة أخرى فإن النظام يصل إلى حالة الرنين . ولدائرة LC البسيطة تردد طبيعى تهتز عنده أيضًا . وسنقوم الآن باستكشاف أوجه الشبه بين الرنين فى النظامين الكهربائى والميكانيكى . قارن بين دائرة LC والطفل الجالس على الأرجوحة فى الشكل 13-21 . افترض إنه عند لحظة البداية كان التيار فى الدائرة صفرًا بينما كانت الأرجوحة عند أعلى موقع لها . إذا كانت الشحنة



شكل 13-21:
مثلما تتذبذب طاقة الأرجوحة بشكل دائم بين طاقتى الوضع والحركة فإن طاقة الدائرة تختزن بالتبادل فى المكثف و ملف المحاثة .

علـى المكثف هـى q_0 فـإن الطاقة المختزنة بالمكثف ستكون $\frac{1}{2}(q_0^2/C)$. وبالمثل فإنه سيكون للأرجوحة طاقة وضع تثاقلية بسبب الجاذبية .

ونعلم أن المكثف سيبدأ فى التفريغ فى حالة النظام الكهربائى خلال ملف المحاثة . وسينمو التيار ببطء ملحوظ لأن ملف المحاثة يعارض أى تغير فى التيـار . وبـالمثل تبـدأ الأرجوحة فى اكتساب السرعة كلما تغلبت قـوى التسارع المؤثرة عليـها علـى قصورها الذاتى . أى أن كلاً من الأرجوحة والمكثف تفقد طاقة الوضع الخاصة بها . وعندما تصل الأرجوحة إلى قاع مسارها ، فإن كل ما لديها من طاقة وضع يتحـول إلى طاقـة حركـة . وإذا نقلنا التشابه إلى الدائرة فإنه عندما يفقد المكثـف كـل شحنتـه فـإن التيـار المـار فـى الدائرة يكون قد وصل إلى أقصى قيمـة وتصبـح الطاقـة الأصليـة مختزنـة الآن فـى ملـف المحاثة ومقدارها $(Li^2/2)$. ويمثل الشكل 13-21 ب هذا الموقف .

ومن الطبيعى ألا تتوقف الأرجوحة عند القاع ، إذا يظل قصورها الذاتـى يدفعـها إلى الحركة إلى أن تسكن تمامًا فى الموضع المبين فى الشكل 13-21 (جـ) لقد أصبحـت كـل طاقتها الآن وضعية مرة أخرى . ويحـدث الشـىء نفسـه تمامًـا فـى الدائـرة الكهربيـة . فالمحاثة - بما لديها من قصور ذاتى من نوع خاص - ستعارض أى تغير فى التيار ولـهذا لا يتوقف التيار دفعة واحدة . ومع مرور الوقت يتوقف التيـار فـى النهايـة ويتـم شحـن المكثف تمامًا من جديد كما فى الجزء (جـ) وتتكرر هذه العمليات مرارًا وتكرارًا .

إن الدائـرة الكهربيـة تمـر بعمليـات تبـادل للطاقـة مثلمـا يحـدث فـى حـال الطفـل والأرجوحـة . فتـتراوح طاقـة الأرجوحـة بـين وضعيـه وحركيـة أمـا الطاقـة فـى الدائـرة الكهربية فهى تارة تختزن فى المكثف وأخرى فى ملف المحاثة . ويظـل كـلا النظـامين يتذبذبان إلى الأبد جيئة وذهابًا مالم يكن هنـاك فقـد للطاقـة . ففـى حالـة الأرجوحـة ، يتسبب الفقد نتيجة الاحتكاك فى تخميد الذبذبات فى نهاية الأمـر فتـأخذ سعـة الذبذبـات فى الاضمحلال ببطء .

بل يمكننا أيضا تتبـع المزيـد مـن التمـاثل بـين النظـامين . إن لكـل مـن الأرجوحـة والدائرة ترددات رنين طبيعية تميز حركتها . إن نظـام الأرجوحـة يمثـل بنـدولاً ، وقـد حسبنا التردد الطبيعى لذبذباته فى القسـم 6-14 . وتـردد الرنـين الطبيعـى للدائـرة هـو التردد الرنينى الذى حسبناه بالمعادلة 13-21 .

فإذا رغبنا فى جعل الطفل يتأرجح عاليًا جدًا ، فإن علينا دفعه وهو على الأرجوحة فى الوقت المناسب تمامًا وبتردد يساوى تردد الرنين الخاص بالأرجوحة . كمـا أننـا قـد وجدنا أن تيارًا كبيرًا جدًا ينمو فى الدائرة LC إذا قام المذبـذب « بدفـع » الدائـرة عنـد ترددها الرنينى . ومن ثم فإنه حتى سلوك الرنين فى النظـامين متشابه إلى حـد بعيـد . وسيتضح عند دراسة الفصل التالى أن دائرة LC الرنينية تمثل جزءًا مهما فـى أى جـهاز استقبال إذاعى أو تليفزيونى .

مثال 5-21 :

لديك دائرة LRC متصلة على التوالي حيث $R = 10.0\ \Omega$ و $L = 50.0\ mH$ و $C = 5.00\ pF$. وكان هناك جهد قيمته 20.0 V rms مطبق على الدائرة عند ترددات مختلفة . (أ) ما هو تردد رنين الدائرة ؟ (ب) ما هي قيمة rms للتيار عند تردد الرنين ؟ (جـ) احسب معاوقة الدائرة والتيار المار بها عند تردد مقداره يزيد 1% عن تردد الرنين .

استدلال منطقي الجزءان (أ) و (ب) :

سؤال : ما هو شرط حدوث تردد الرنين ؟

الإجابة : يحدث الرنين عند تردد يتحقق معه الشرط $X_C = X_L$.

سؤال : ما هي معادلة f_0 ؟

الإجابة : $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

سؤال : ما هي العلاقة بين V و I عند الرنين ؟

الإجابة : عند الرنين $Z = R$ ولهذا يكون $I = V/R$.

الحل والمناقشة : تردد الرنين هو

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(50.0\times10^{-3}\ H)(50.00\times10^{-12}\ F)}} = 3.18\times10^5\ Hz$$

أما قيمة (rms) للتيار عند هذا التردد فهي

$$I = \frac{20.0\ V}{10.0\ \Omega} = 2.00\ A$$

استدلال منطقي الجزء (جـ) :

سؤال : ما هو التردد الذى يزيد 1% فوق تردد الرنين f_0 ؟

الإجابة : $f = 1.01 f_0$ أو $f = 1.01\,(3.18\times10^5\ Hz)$.

$= 3.21\times10^5\ Hz$

سؤال : ما هي قيم X_C و X_L عند هذا التردد ؟

الإجابة :

$$X_C = \frac{1}{2\pi(3.21\times10^5\ Hz)(5.00\times10^{-12}\ F)} = 9.9\times10^4\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi\,(3.21\times10^5\ Hz)\,(50.0\times10^{-3}\ H) = 1.01\times10^5\ \Omega$$

سؤال : ما الفرق بين هذين الردين ؟

الإجابة : $X_L - X_C = 2000\ \Omega$

سؤال : ما هي المعاوقة عند التردد $1.01 f_0$ ؟

الإجابة : $Z = \sqrt{(10\ \Omega)^2 + 2000\ \Omega)^2} = 2000\ \Omega$

الحل والمناقشة : يلاحظ أن كلاً من X_L و X_C كبيرة جدًا بالمقارنة بالمقاومة R ، حتى عند الرنين . وما لم يكن أحدهما يلغى الآخر تمامًا (عند الرنين) فإنهما يشكلان إعاقة للتيار أكبر بكثير مما تشكله المقاومة بمفردها فالتيار عند التردد $f = 1.01\ f_0$ هو فقط ،

$$I = \frac{20\ \text{V}}{2000\ \Omega} = 0.01\ \text{A}$$

وهو ما يشكل 0.5 فى المائة فقط من تيار الرنين . وبذلك يكون استهلاك القدرة الذى يعتمد على I^2 هو $(0.005)^2 = 2.5 \times 10^{-5}$ من قيمة الاستهلاك عند الرنين . وتستخدم الدوائر ذات الرنين الحاد مثل هذه الدائرة فى أجهزة استقبال الراديو الحساسة ، كما سنرى فى الفصل التالى .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) الثابت الزمنى RC ؛ (ب) التيار المتردد فى مقابل التيار المستمر من حيث التيار وفرق الجهد ، (جـ) القيم الفعالة وقيم (rms) ، (د) الرد (المفاعلة) السعوى ، (هـ) الرد (المفاعلة) الحثى ، (و) المعاوقة ، (ز) مُعامل القدرة ، (ح) الرنين فى دائرة LC .

2 أن ترسم منحنيات التيار والشحنة فى دائرة RC أثناء الشحن والتفريغ . أن تعرف الثابت الزمنى للدائرة وتربطه بالمنحنيات .

3 أن ترسم منحنى نموذجيًا للجهد أو التيار المترددين مبينًا عليه القيم العظمى والمتوسطة و (rms) . أن تربط قيمة (rms) بالقيمة عند القمة بشكل كمى (فى صورة معادلة رياضية) .

4 أن تذكر صورة قانون أوم التى تنطبق على جهد متردد مطبق على مقاوم . وأن ترسم منحنيات بيانية لعلاقة التيار بفرق الجهد على نفس الرسم . وأن تحسب متوسط فقد القدرة فى المقاوم عندما تتوافر لديك البيانات اللازمة .

5 أن تفسر لماذا يكون التأثير المعاوق للمكثف أكبر عند الترددات المنخفضة عنه عند الترددات المرتفعة . وأن تستخدم العلاقة $V = IX_C$ فى حالات بسيطة .

6 أن ترسم ـ تخطيطيًا ـ منحنيات العلاقة بين التيار وفرق الجهد بالنسبة لمكثف يتصل بمصدر قدرة متردد التيار . وأن تذكر متوسط فقد القدرة فى المكثف .

7 أن تفسر السبب فى أن التأثير المعاوق لملف محاثة لابد وأن يكون أكبر عند الترددات المرتفعة عنه عند الترددات المنخفضة . وأن تستخدم العلاقة $V = IX_L$ فى حالات بسيطة .

8 أن ترسم ـ تخطيطيًا ـ منحنيات العلاقة بين التيار وفرق الجهد بالنسبة لملف محاثة يتصل بمصدر قدرة متردد التيار . وأن تذكر متوسط فقد القدرة فى ملف المحاثة .

9 أن تستخدم العلاقة $V = IZ$ بالنسبة لمسائل بسيطة تتضمن دوائر LRC متصلة على التوالى .

10 أن تستخدم العلاقة $V = IZ$ لتفسر لماذا يوجد تردد رنين لدائرة LC . وأن تبين كيف تحصل على تردد الرنين .

أسئلة وتخمينات

1 إذا أعطيت مكثفًا سعته $2\mu\text{F}$ وخلية جافة وجهازًا حساسًا متعدد الأغراض لقياس التيار ، فكيف تستعملها فى قياس مقاومة يظن أنها حوالى $10^8\ \Omega$؟ وهل تستطيع القيام بالقياسات باستخدام فولتميتر عادى بدلاً من جهاز قياس التيار ؟

2 يستخدم فى بعض الأماكن أحيانًا جهد منخفض التردد (أقل بكثير من 60 Hz) وترتعش الأضواء الكهربية التى يغذيها مثل هذا الجهد . اشرح السبب فى حدوث هذا الارتعاش .

3 فى أى من هذه التطبيقات يكون استخدام جهد ذى تيار مستمر أو تيار متردد مقبولاً على قدم المساواة : ضوء متوهج ، موقد كهربائى ، التحليل الكهربى ، جهاز تليفزيون ، إضاءة فلورية (فلورسنت) ، محول لأحد إعلانات النيون ، جهاز شحن البطاريات ، محمصة الخبز ، ساعة كهربائية ؟

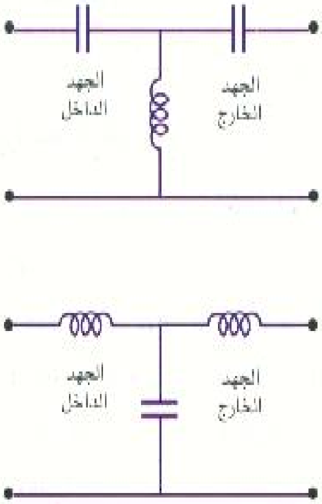
4 ما هى أوجه التماثل بين اهتزاز كتلة مثبتة على ياى (زنبرك) وذبذبة دائرة LC ؟ ما هى المقادير المناظرة للمحاثة L والسعة C فى النظام الميكانيكى ؟ اشرح .

5 قارن بين معادلتى تردد الرنين الخاص بكتلة تهتز عند طرف زنبرك والرنين بالنسبة لدائرة LC . ما هى أوجه التماثل بينهما .

6 يتصل فولتميتر يعمل بالتيار المستمر عبر طرفى مذبذب متغير التردد . كيف يكون سلوك الجهاز القياسى عند تغير تردد الجهد المتذبذب ببطء من 0.01 إلى 100 Hz ؟ اشرح .

7 متى يكون التيار خلال دائرة LRC متصلة على التوالى متفقًا فى الطور مع جهد المصدر ـ إن كان هذا ممكنًا على الإطلاق ـ ؟

8 نشر هذا التصريح فى إحدى الجرائد اليومية : « صرح مدير الصحة بالمدينة بتحذير من أن الأجهزة الكهربائية المنزلية يمكن أن تحدث إصابات قاتلة . وقد جاءت هذه التحذيرات عقب مصرع فتى يبلغ من العمر ثمانية عشر عامًا عندما صعق بالكهرباء عند إدخال شوكة طعام فى محمصة الخبز . وقد أشار مدير الصحة السيد . د . سميث بأنه حتى البالغين يمكن أن يُقتلوا بمثل هذه الصدمات الكهربائية وأن التيار المنزلى المعتاد هو 110 V ولكن الجهد يزداد إذا وصل التيار بالأرض » . ما هو الخطأ فى الجملة الأخيرة وكيف يمكن تصويبها ؟



شكل م 1-21

9 الدوائر المرسومة فى الشكل م 1-21 يطلق عليها مرشحات . وعندما يتم إدخال فرق جهد إليها فإن الجهد المتردد الخارج منها سيعتمد على تردد الجهد المتذبذب . وتسمح إحدى هذه النبيطات للجهد الداخل بأن يمر دون أية اضطرابات إذا كان تردد الذبذبات مرتفعًا . أما الأخرى فتسمح للجهود ذات التردد المنخفض فقط بالمرور . اشرح أى الدائرتين تؤدى الوظيفة الأولى وأيها تؤدى الوظيفة الثانية .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

قيم جذر متوسط المربعات (rms)

العلاقة بين سعة تيار أو جهد يتغير جيبيًا (i_0 و v_0) وقيم (rms) (I و V) هى كالتالى :

$$I = \frac{i_0}{\sqrt{R}} \qquad , \qquad V = \frac{v_0}{\sqrt{2}}$$

خلاصة

1 إن قيم rms هى التى تدخل فى حساب القدرة التى يوفرها جهد المصدر أو التى تتحول إلى حرارة فى مقاوم ما :

$$P = IV_R = I^2R$$

2 ونتيجة لما سبق فإن السعات يمكن اشتقاقها من قيم rms بالعلاقة :

$$i_0 = (\sqrt{2})I = 1.414\ I \quad , \quad v_0 = (\sqrt{2})V = 1.414\ V$$

تغير الشحنة مع الزمن فى دائرة RC متصلة على التوالى

تنمو الشحنة (ومن ثم الجهد) على مكثف فى دائرة RC عند إغلاق المفتاح تبعًا للعلاقة التالية :

$$q(t) = q_f(1 - e^{-t/T_C})$$

حيث $q_f = CV_C$ و $T_C = RC$ وهو الثابت الزمنى السعوى .

علاقات الطور بين التيار والجهد فى دوائر التيار المتردد

دائرة مقاومة نقية يكون التيار والجهد اللحظيان متفقين فى الطور .

دائرة سعة نقية يتقدم التيار اللحظى على الجهد بمقدار 1/4 دورة .

دائرة محاثة نقية يتقدم الجهد اللحظى على التيار بمقدار 1/4 دورة .

العلاقة بين I و V فى دوائر التيار المتردد : الردود (المفاعلات)

دائرة مقاومة نقية $V = IR$ (قانون أوم) .

دائرة سعة نقية $V = IX_C$

حيث $X_C = \dfrac{1}{2\pi fC}$ هى الرد السعوى (المفاعلة السعوية)

دائرة محاثة نقية $V = IX_L$

حيث $X_C = 2\pi fL$ هى الرد الحثى (المفاعلة الحثية)

خلاصة

1 وحدة كل من R و X_C و X_L هى الأوم .

2 لا تعتمد المقاومة على التردد ، بينما تعتمد الردود X_L و X_C على كل من التردد وقيم L و C على الترتيب .

3 ينطبق قانون أوم بالنسبة للمقاومات على قيم v و i اللحظية وعلى قيم rms أيضًا لأنهما متفقان فى الطور . أما العلاقة المكافئة لقانون أوم بين التيار والجهد بالنسبة للمكثفات وملفات المحاثة فتنطبق **فقط** على قيم rms وقيم سعة الذبذبة ولا تنطبق على v و i لأنهما مختلفان فى الطور عبر C و L .

العلاقة بين V و I فى دائرة LRC المتصلة على التوالى ويغذيها تيار متردد

يرتبط V و I خلال معاوقة الدائرة Z فى دائرة LRC المتصلة على التوالى :

$$V = IZ$$

حيث

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

خلاصة

1 تؤدى علاقات الطور المتعاكسة بين v و i بالنسبة للمكثفات وملفات المحاثة إلى أن تأثيراتهما تطرح . ثم يضاف الفرق بينهما إلى المقاومة بطريقة جمع المتجهات .

2 فى دائرة RL تكون $X_C = 0$ وتكون $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$.

3 فى دائرة RC تكون $X_L = 0$ وتكون $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$.

زاوية الطور في دوائر LRC

تعطى زاوية الطور ϕ المحصورة بين v و i في دائرة LRC بالمعادلة :

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} \qquad \text{أو} \qquad \phi = \cos^{-1}\frac{R}{Z}$$

خلاصة

1 إذا كان $X_C > X_L$ فإن الجهد اللحظي يتخلف عن التيار بزاوية الطور هذه .

2 إذا كان $X_L > X_C$ فإن الجهد اللحظي يسبق التيار بزاوية الطور هذه .

الرنين في دوائر LRC

عند تردد الرنين f_0 حيث $X_L = X_C$ ، تتلاشى الردود وتبقى $Z = R$ وهذه هي أقل قيمة للمعاوقة Z ولذا فعندها يمر أقصى تيار ممكن . وتسمى هذه الحالة رنينًا ويسمى f_0 تردد الرنين .

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

خلاصة

1 تعمل دائرة LRC عند الرنين كما لو كانت دائرة مقاومة صافية . $I = V/R$ ويصبح الجهد والتيار متفقين في الطور $(\phi = 0)$.

القدرة في دوائر التيار المتردد

مُعامل القدرة يطلق على المقدار $\cos \phi$ مُعامل القدرة لدائرة تيار متردد ومتوسط القدرة الواصلة إلى دائرة تيار متردد هو :

$$P = IV\cos\phi = IV\left(\frac{R}{Z}\right)$$

استهلاك القدرة يتم متوسط استهلاك القدرة (تحولها إلى حرارة) في دائرة تيار متردد داخل المقاومة R بالكامل :

$$P\ (\text{في } R) = I^2R$$

وليس هناك أى قدرة مستهلكة في مكثف أو ملف محاثة .

مسائل

القسم 1–21

1 إذا كان الثابت الزمني لدائرة RC هو $4.0\ s$ فكم تبلغ قيمة المقاوم الواجب توصيله على التوالى مع مكثف سعته $0.50\ \mu F$ ؟

2 ما مقدار الوقت الذى يستغرقه تيار الشحن لكي يهبط إلى ثلث $1/3$ قيمته الأصلية عندما يشحن مكثف سعته $3.0\ \mu F$ من خلال مقاوم مقداره $10\ M\Omega$ بواسطة بطارية قوتها $9.0\ V$ ؟

3 تتكون دائرة متصلة على التوالى من مكثف غير مشحون سعته $4.0\ \mu F$ ومقاوم مقداره $6.0\ M\Omega$ وبطارية $12\ V$ ومفتاح . ما مقدار التيار المار في الدائرة والشحنة التى على المكثف . (أ) بعد قفل المفتاح مباشرة ؟ و (ب) بعد مرور ثابت زمني واحد ؟

4 تتكون دائرة متصلة على التوالى من مكثف سعته $6.0\ \mu F$ مشحون إلى جهد قيمته $9\ V$ ومفتاح ومقاوم قيمته $50\ M\Omega$. ما مقدار التيار المار في الدائرة وفرق الجهد عبر المكثف . (أ) عند غلق المفتاح أول مرة (ب) بعد مرور ثابت زمني واحد بعد غلق المفتاح .

▪ 5 تتكون دائرة متصلة على التوالى من بطارية $9.0\ V$ ومقاوم مقدار $4\ M\Omega$ ومكثف سعته $5.0\ \mu F$ ومفتاح مفتوح . وكان المكثف في البداية غير مشحون . ثم اقفل المفتاح . (أ) ما هو الثابت الزمني للدائرة ؟ (ب) كم من الوقت يستغرق المكثف حتى يشحن إلى ثلثيه $(2/3)$ ؟ (جـ) ما مقدار الشحنة التى ستسرى إلى المكثف في الزمن المحسوب في الفقرة (ب) ؟ (د) ما هو متوسط التيار تقريبًا الذى يسرى إلى المكثف خلال هذه الفترة ؟

■ 6 افترض أنك تقوم بقياس مقاومة جسمك فيما بين يديك بواسطة أوميتر ووجدت إنـها $62\ k\Omega$. ثم شحن مكثف سعته $20.0\ \mu F$ حتى جهد مقداره $12.0\ V$ وفصل ، ثم قمت أنت بإمساك طرفى المكثف ، كل طرف بيد . (أ) ما هو الثابت الزمنى للدائرة ؟ (ب) ما هو فرق الجهد عبر المكثف تقريبًا بعد مرور $0.8\ s$ ؟ (جـ) ما هـى الشحنـة علـى المكثـف عندمـا يكون فرق الجهد عبره هو $9.0\ V$ ؟ (د) ما هو متوسط التيار تقريبًا ، والذى يسرى خلال جسدك فى فترة $0.8\ s$ ؟

■ 7 شحن مكثف متصل على التوالى مع مقاومة وبطارية . ما هى النسبة المئوية للشحنة على المكثف بعـد مـرور ثـابتين زمنيـين بعد إقفال المفتاح ؟

■ 8 وصل مكثفان سعتاهما $3.0\ \mu F$ و $6.0\ \mu F$ على الترتيب ، على التوالى مع مقاوم $5.0\ M\Omega$ وبطارية $9.0\ V$ ومفتاح مفتوح . (أ) ما هو الثابت الزمنى للدائرة ؟ (ب) ما هو فرق الجهد عبر المكثف $6.0\ \mu F$ بعد ثابت زمنى واحد ؟ (جـ) مـا مقـدار الشحنة التى وصلت إلى المكثف $3.0\ \mu F$ خلال هذه الفترة ؟

القسمان 2–21 و 3–21

9 وصل أميتر للتيار المتردد على التوالى مع مصباح إنارة متوهج فقرأ $0.4\ A$ وقرأ فولتميتر للتيار الـمتردد الجـهد عـبر المصباح فكانت القراءة $110\ V$. ما هى القيمة القصوى (القممية) للتيار المار خلال المصباح وما هو أقصى فرق جهد عبره ؟

10 طبق فرق جهد قيمة rms له $110\ V$ على جهاز كهربائى مقاومته $15\ \Omega$. ما هو أقصى تيار يمر خلال الجهاز . ومـا هـى قيمة rms له ؟

11 مرر تيار خلال بصيلة متوهجة فكانت قراءة أميتر التيار المتردد هو $0.72\ A$ وقراءة فولتميتر تيار متردد متصل مـع البصيلـة على التوازى هو $120\ V$. (أ) ما هو التيار الأقصى (القممى) وفـرق الجـهد القممـى للبصيلـة ؟ مـا مقـدار القـدرة التـى تستهلكها البصيلة ؟ ما هى مقاومة البصيلة ؟

12 ما هى مقاومة بصيلة إضاءة تستهلك قدرة متوسطة قيمتها $60\ W$ عند توصيلـها بمصـدر قـدره تـردده $60\ Hz$ وقيمـة rms لجهده هى $110\ V$ ؟

13 ما مقدار التيار الذى تسحبه محمصة خبز قدرتها $900\ W$ وتعمل عند جهد $110\ V$ من خط قدرة للتيار المتردد جـهده هـو $110\ Vrms$ ؟ ما مقاومة محمصة الخبز أثناء التشغيل العادى ؟ ما مقدار ما تولده من سعرات حرارية خلال 5 دقائق ؟

■ 14 وصلت بصيلتا إضاءة قدرة كل منهما $120\ W$ وبصيلة قدرتها $90\ W$ على التوازى مع مصدر منزلى يوفر $110\ Vrms$ متردد . أوجد قيمة rms للتيار ومقاومة كل من البصيلات .

■ 15 يعطى التيار المار خلال مقاوم $40\ \Omega$ بالعلاقة $i = \sin 240\, tA$. ما مقدار القدرة التى يبددها التيار خلال المقاوم ؟

■ 16 مصدر للجهد يعطى جهدًا يعبر عنه بالعلاقة $v = 120 \sin 377\, tV$. أوجد (أ) تـردد المصدر ، (ب) قيمـة rms للجهد عند الخرج و (جـ) الجهد عند اللحظة $t = (1/15)\ s$.

■ 17 ما هى القيمة القصوى وقيمة rms للتيار عند يوصل المصدر المذكور فى المسألة رقم 16 بمقاومة مقدارها $60\ \Omega$ ؟ وما مقدار القدرة التى يبددها المقاوم ؟

■ 18 طبق جهد صورته $v = 60 \cos 300\, tV$ عبر مقاوم $25\ \Omega$. ما مقدار القدرة المبددة فى المقاوم ؟

■ 19 يبلغ جهد الخرج فى مولد تيار متردد v_0 ويزداد $v = 0.3\, v_0$ عند $t = 0.004\ s$ ما هو تردد المولد ؟ (اعتبر $v = 0$ عند $t = 0$) .

■ 20 وصل مصدر $60\ Hz$ و $110\ V$ للتيار المتردد عبر مقاوم $30\ \Omega$. (أ) أوجد التيار المسحوب من مصدر الجهد . (ب) كـرر الحسابات إذا كان التردد $5000\ Hz$. (جـ) ما مقدار القدرة المبددة فى كل حالة .

■ 21 يأخذ التيار المار فى دائرة مقاومة فى الزيادة عند $t = 0.004\ s$ وتصل قيمته إلى 72 فى المائة من القيمة القصـوى . مـا هـو تردد المصدر ؟ (اعتبر $i = 0$ عند $t = 0$) .

القسم 21-4

22 ما هى قيمة rms للتيار الذى يسحبه مكثف سعته $4.0 \mu F$ من مصدر 110 V, 60 Hz يتصل عبره مباشرة ؟ كرر الحسابات بالنسبة لمصدر آخر 110 V, 60,000 Hz .

23 وصل مكثف $3.0 \mu F$ مباشرة عبر مصدر 240 Hz , 60 V . ما مقدار قيمة rms للتيار المسحوب من المصدر ؟ كرر الحسابات لمصدر آخر تردده 0.4 MHz .

24 يبلغ الرد السعوى لمكثف فى دائرة ما $40\ \Omega$ عندما كان تردد المصدر 120 Hz ما هو الرد السعوى للمكثف إذا تغير تردد المصدر إلى 10,000 Hz ؟

25 وصل مصدر للتيار المتردد يوفر جهدًا قيمة rms له 42 V وتردده 90 Hz بمكثف سعته $2.8 \mu F$ مباشرة . ما هى قيمة rms للتيار الواصل إلى المكثف من المصدر ؟

▪ 26 وصل مصدر للتيار المتردد تردده 60 Hz والقيمة القصوى للجهد الخارج منه 170 V بمكثف مجهول السعة مباشرة . ما هى سعة المكثف التى تؤدى إلى سحب تيار قيمة rms له 0.72 A ؟

▪ 27 يمر تيار قيمة rms له 0.4 A فى دائرة تحتوى على مكثف سعته $5.0 \mu F$ متصل بمصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهده 40 V . ما هو تردد المصدر ؟

▪ 28 يتصل مكثف سعته $8.0 \mu F$ مباشرة بمصدر للقدرة 220 V, 50 Hz . (أ) ما هى القيمة المتوسطة للقدرة التى يستهلكها المكثف ؟ (ب) ما قيمة rms للتيار المار فى المكثف ؟ (جـ) ما هى الشحنة القصوى على المكثف ؟

▪ 29 ما هو معامل التغير بالنسبة للتيار المار إلى مكثف عندما يتغير تردد الجهد المطبق عبره بحيث يزيد بمعامل مقداره (أ) 10 ، (ب) 100 ، و (جـ) 10,000 ؟ اعتبر أنه ليست هناك مقاومة للدائرة وأن مقدار جهد المصدر يبقى ثابتًا .

▪ 30 وصل مكثفان $2.0 \mu F$ و $6.0 \mu F$ على التوالى عبر مصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهده 240 V وتردده 50 Hz . ما هى أقصى شحنة على كلٍ من المكثفين ؟

القسم 21-5

31 أوجد الرد الحثى لملف محاثته 4.0 mH عند تردد مقداره (أ) 60 Hz ، (ب) 600 kHz .

32 إذا أريد أن يكون الرد الحثى لملف محاثة هو $32\ \Omega$ عندما يكون التردد 1200 Hz . فما هى قيمة محاثته ؟ وما هو الرد الحثى له عند 6.0 Hz ؟

33 احسب محاثة ملف له رد حثى مقداره $60\ \Omega$ عندما يكون التردد الزاوى للمصدر 1508 rad/s .

34 وصل ملف محاثة بمصدر قدرة تردده 30 Hz وقيمة rms لجهده 50 V . ما هى قيمة المحاثة المطلوبة حتى يكون أقصى تيار يمر بالدائرة تحت 90 mA ؟

35 بلغ فرق الجهد بين طرفى دائرة حث نقية بقيمة rms هو 110 V . (أ) احسب محاثة الملف إذا كانت قيمة (rms) للتيار هى 8 A وتردده 60 Hz . (ب) ما هو التردد الذى يخفض قيمة rms للتيار إلى نصف مقدارها الأصلى ؟

▪ 36 وصل مصدر جهد متردد مباشرة عبر ملف محاثة مثالى 30 mH فمر تيار بقيمة (rms) 0.8 A عندما كانت القيمة القصوى لفرق الجهد 9 V . (أ) ما هو تردد المصدر ؟ (ب) إذا ضوعف التردد ثلاث مرات وظل الجهد ثابتًا كما هو أى 9.0 V فكم تكون قيمة rms للتيار المار فى الملف ؟

▪ 37 بلغ الرد الحثى لملف ما $78\ \Omega$ عند تردد قدره 60 Hz . كم يبلغ أقصى تيار إذا وصل هذا الملف بمصدر تردده 50 Hz وفرق الجهد 220 V rms ؟

■ 38 وصل مصدر للجهد المتردد مباشرة عبر ملف محاثة عديم المقاومة 1.2 mH . كم يبلغ فرق الجهد الذي يجعل تيارا مقداره 1.80 A يمر إذا كان التردد هو (أ) 50 kHz و (ب) 500 kHz ؟

القسم 6-21

39 وصل مقاوم 40 Ω على التوالي مع مكثف 30 μ F ومولد للتيار المتردد قيمة rms لجهده هي 80 V وتردده 60 Hz . أوجد (أ) قيمة rms للتيار المار في الدائرة ، (ب) فرق الجهد عبر المكثف ، (جـ) زاوية الطور بين التيار والجهد اللحظيين .

40 وصل مكثف 4.0 μ F ومقاوم 400 Ω على التوالي عبر مصدر للقدرة 120 Hz – 30 V . أوجد التيار المار في الدائرة والقدرة المسحوبة من المصدر .

■ 41 وصل مكثف 50 Ω على التوالي مع مكثف 6.0 μ F عبر مصدر للجهد . ما هو التردد الذي تكون عنده قيمة rms عبر المقاوم هي نفسها عبر المكثف ؟

■■ 42 تتكون دائرة متصلة على التوالي من مصدر للقدرة 1200 Hz – 60 V و مقاوم 1 kΩ ومكثف مجهول السعة . وكان rms للجهد عبر المقاوم 42 V . ما هو التيار المار في الدائرة وما قيمة المكثف ؟

43 وصل ملف محاثة 4.0 mH مقاومته 200 Ω مباشرة عبر مصدر قدرة 6000 Hz – 30 V . أوجد التيار المار في الدائرة والقدرة المسحوبة من المصدر .

44 وصل ملف محاثة مثالي 5 mH على التوالي مع مقاوم 60 Ω عبر مصدر للجهد المتردد متغير القيمة . ما هو التردد الذي يكون عنده rms للجهد عبر المقاوم هو نفس المقدار عبر ملف المحاثة ؟

■■ 45 وصل ملف محاثة مجهول L على التوالي مع مقاوم 800 Ω ومصدر للقدرة 2000 Hz – 90 V . وكان فرق الجهد عبر المقاوم هو 40 V . ما هو التيار المار في الدائرة وما هي قيمة المحاثة ؟

46 ما هو التردد الذي يكون فيه الرد السعوي لمكثف سعته 70 μ F مساويًا للرد الحثي لمحاثة مقدارها 70 mH ؟

47 وصل مصدر تردده 60 Hz عبر مكثف سعته 40 μ F . ما هو ملف المحاثة الذي يسحب نفس التيار عند توصيله عبر نفس المصدر ؟

■ 48 وصل مكثف سعته 3.0 μ F مع ملف محاثة على التوالي عبر مصدر 60 Hz – 110 V . وكانت محاثة الملف 0.6 mH ومقاومته 720 Ω . (أ) أوجد التيار المار في الدائرة . (ب) أعد الحسابات بالنسبة لتردد قيمته 6000 Hz .

■ 49 ما هي قيمة المحاثة الواجب توصيلها على التوالي مع مكثف سعته 6 μ F ومقاوم 40 Ω ، ومصدر للقدرة 50 – 240 V Hz إذا كانت rms للتيار المار في الدائرة هي 3.2 A ؟

■ 50 وصل مقاوم 50 Ω مع ملف محاثة 80 mH ومكثف سعته 40 μ F على التوالي مع مصدر للتيار المتردد 60 Hz – 90 V . أوجد فرق الجهد (أ) عبر المجموعة RC و (ب) عبر المجموعة LC .

■ 51 تتكون دائرة LRC من مقاوم 50 Ω ، ومكثف 12 μ F ، وملف محاثة 240 mH بحيث تتصل معًا على التوالي ، مع مصدر للقدرة 60 Hz – 110 V . (أ) ما هي زاوية الطور بين التيار والجهد المطبق ؟ هل يقود التيار فرق الجهد أم يتخلف وراءه ؟

■ 52 وصل مقاوم 100 Ω ومكثف سعته 20 μ F وملف محاثة محاثته 180 mH على التوالي مع مصدر قدرة 60 Hz – 110 V . أوجد (أ) التيار المار في الدائرة ، (ب) فرق الجهد عبر المجموعة LC ، (جـ) فقد القدرة في الدائرة ، (د) ومعامل القدرة .

■ 53 يسحب ملف محاثة تيارًا مقداره 0.8 A عندما يتصل عبر بطارية قوتها 12 V ، وتيارًا مقداره 3.6 A عندما يتصل بمصدر للتيار المتردد ذي ق.د.ك 110 V وتردده 60 Hz . ما هي محاثة الملف وما مقدار القدرة التي يسحبها من مصدر التيار المتردد ؟

54 ملف محاثته 300 mH ومقاومة مقدارها 120 Ω يمكن اعتبارها متصلة على التوالي معه . ما هو التردد الذي تكون المعاوقة عنده 144 Ω ؟

55 تبلغ مقاومة دائرة LRC على التوالي 100 Ω وتبلغ معاوقتها 210 Ω . ما هو متوسط القدرة التي ستبدد في الدائرة إذا وصلت بمصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهده 110 V ؟

■ 56 وصل ملف محاثة ومكثف ومقاوم على التوالي عبر مصدر للقدرة . وكانت قيم rms للجهود كالتالي : 120 V عبر ملف المحاثة ، 60 V عبر المكثف ، 60 V عبر المقاوم . أوجد (أ) القيمة القممية لجهد المصدر و (ب) زاوية الطور بين i و v .

القسم 7-21

57 (أ) ما هي سعة مكثف يعطي تردد رنين مقداره 60 Hz عند توصيله على التوالي مع ملف محاثة 0.40 mH ؟ (ب) ما هو ملف المحاثة المطلوب ليحدث رنينًا عند نفس التردد مع مكثف سعته 6 μF ؟

58 عند توصيل ملف محاثة على التوالي مع مكثف سعته 5.0 μF فإنه يحدث رنينا حادًا عند تردد مقداره 720 Hz . ما هي قيمة محاثة الملف ؟

■ 59 يؤثر مصدر اهتزازات متغير التردد على دائرة متصلة على التوالي ومكونة من $R = 1600\ \Omega$ ، $L = 400$ mH ، $C = 10\ \mu$F .
(أ) ما هو تردد رنين الدائرة ؟ (ب) ما هي معاوقة الدائرة عند تردد الرنين ؟

■ 60 تستخدم دائرة LRC في جهاز راديو لضبط محطة FM الإذاعية عند 96.5 MHz . وقد كانت قيمة المحاثة في الدائرة 1.44 MH والمقاومة 14 Ω . ما هي قيمة سعة المكثف الواجب استخدامها لالتقاط هذه المحطة ؟

■ 61 يستخدم مكثف متغير السعة في دائرة تناغم لترددات AM الإذاعية في المدى من 500 إلى 1600 kHz . وإذا استخدمت محاثة مقدارها 4 μH على التوالي مع المكثف فما هي القيم الطرفية لسعة المكثف المتغير حتى يمكن تغطية مدى الترددات المذكور .

■■ 62 وصل مقاوم 30 Ω ومكثف 3 μF وملف محاثة 4 mH على التوالي مع مصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهد الخرج لديه هي 60 V . أوجد . (أ) تردد الرنين لهذه الدائرة ، (ب) التيار المار عند تردد الرنين ، (جـ) القدرة الواصلة إلى الدائرة عند تردد مقداره نصف تردد الرنين .

مسائل إضافية

■ 63 عندما يوصل مكثف سعته 3.0 μF عبر مصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهده هي 9.0 V فإن قيمة rms للتيار المار من خلاله تكون 20.0 mA . (أ) ما هو التردد العامل في هذا المصدر ؟ (ب) إذا حل ملف مثالي محاثته 0.2 H محل المكثف فما هي قيمة rms للتيار المار خلال الملف ؟

■■ 64 وصلت دائرة LRC قيمة R بها 60 Ω عبر مصدر للتيار المتردد تردده 300 Hz و rms لجهده 180 V . وكانت rms للجهد هي نفسها عبر كلٍ من عناصر الدائرة . (أ) ما قيمة فرق الجهد عبر ملف المحاثة النقي ؟ (ب) ما هي قيم كلٍ من L و C ؟

■■ 65 وصلت محاثة مقدارها 0.8 H على التوالي مع مصباح فلورسنتي لتحديد قيمة التيار المار خلال المصباح . ثم وصلت المجموعة بخط قدره يتيح 110 V – 60 Hz . فإذا كان فرق الجهد عبر المصباح 48 V . فما هو التيار المار في الدائرة ؟ اعتبر أن المصباح بمثابة حمل ذي مقاومة صرفة .

■■ 66 يبلغ تردد رنين دائرة LRC متصلة على التوالي $2400/\pi$ Hz . وعند تشغيل الدائرة عند تردد معين أعلى من تردد الرنين فإن الدائرة يصبح لها رد حثي مقداره 14 Ω ورد سعوي مقداره 9 Ω . ما هي قيم المحاثة والسعة في الدائرة ؟

■■ 67 وصل مقاوم وملف محاثة على التوالي بمصدر يتيح 120 V – 60 Hz . وكان فرق الجهد عبر المقاوم هو 54 V والقدرة المبددة في الدائرة هي 16 W . ما هي قيمة المقاومة والمحاثة في الدائرة ؟